



Aalto-yliopisto
Insinöörیتieteiden
korkeakoulu

Ida Lemström

Selvitys jääkuorman ennustemalleista liittyen laivan operatiiviseen monitorointijärjestelmään

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 28.11.2016

Valvoja: Professori Pentti Kujala

Ohjaaja: DI Ville Valtonen ja DI Mikko Suominen

Tekijä Ida Lemström

Työn nimi Selvitys jääkuorman ennustemalleista liittyen laivan operatiiviseen monitorointijärjestelmään

Koulutusohjelma Konetekniikka

Pääaine Meritekniikka

Koodi K3005

Työn valvoja Professori Pentti Kujala

Työn ohjaajat DI Ville Valtonen, DI Mikko Suominen

Päivämäärä 28.11.2016

Sivumäärä 81

Kieli suomi

Tiivistelmä

Tässä diplomityössä tutkitaan jääkuorman ennustemalleja, joiden avulla on mahdollista mitatun jääkuorma-aikahistorian perusteella ennustaa laivan runkoon kohdistuvia tulevia maksimijääkuormia. Jääkuorman ennustemalleja on tarkoitus soveltaa operatiivisessa jääkuormamonitorointijärjestelmässä, joka toimisi vaurioriskiä ennustavana työkaluna aluksen miehistölle. Jääkuormituksen ollessa stokastinen prosessi, tulevia jääkuormia tutkitaan tässä työssä tilastollisin menetelmin. Rakenteisiin kohdistuvaa todennäköisintä maksimijääkuormaan voidaan ennustaa tilastollisten jakaumien avulla, joista tässä työssä käsitellään eksponentti-, Weibull-, Gumbel I- ja Gumbel II-jakaumia sekä kolmea Mikko Lensun kehittämää skaalauskorrelaatioihin perustuvaa menetelmää, joita kutsutaan Lensun Gumbel I-, Lensun Gumbel II- ja Lensun superpositiomenetelmiksi. Työssä käytettävä mitta-aineisto on peräisin Etelämantereelle tarkoitetun tutkimus- ja huolto-aluksen S.A. Agulhas II:n maaliskuun 2012 Perämeren koematkalta.

Työn päätavoite on määrittää, mikä käsitellyistä ennustemalleista soveltuu mitatun jääkuorma-aineiston perusteella lyhyen aikavälin jääkuormien ennustamiseen kaikkein parhaiten sekä kuinka pitkälle tulevaisuuteen jääkuormia on mahdollista ennustaa kohtuullisen luotettavasti. Lisäksi tutkitaan kuinka pitkä ennusteen laskentaan käytettävän ajanjakson tulisi olla, jotta ennuste olisi mahdollisimman luotettava. Laskettaessa jääkuorman ennustetta, oletetaan vallitsevien jääolosuhteiden jatkuvan yhdenmukaisina ja aluksen nopeuden pysyvän vakiona. Lyhyen aikavälin jääkuorman ennustamista tilastollisin menetelmin ei ole aikaisemmin tutkittu tämän työn laajuudella.

Tilastollisten jakaumien soveltuvuutta tulevien jääkuormien lyhyen aikavälin ennustamiseen tutkitaan vertaamalla eri menetelmin arvioituja todennäköisimpiä maksimijääkuormia maksimiarvon laskentaan käytettäviin mitattuihin maksimijääkuormiin sekä eripituisten tulevien ajanjaksojen mitattuihin maksimijääkuormiin. Kaikkien Lensun menetelmien todettiin soveltuvan ennusteen laskentaan merkittävästi eksponentti-, Weibull-, Gumbel I- ja Gumbel II-jakaumia paremmin. Lensun Gumbel II-ennustemallin havaittiin soveltuvan operatiiviseen jääkuormamonitorointijärjestelmään kaikkein parhaiten visuaalisen tarkastelun sekä pienimpien virhearvojen perusteella. Luotettavin ennuste saatiin ennustettavan ajanjakson ollessa mahdollisimman lyhyt ja havaintoperiodin ollessa mahdollisimman pitkä. Ennusteiden virhearvojen ja graafisen tarkastelun perusteella todettiin, että 60, 90 ja 120 minuutin havaintoperiodeilla voidaan varsin luotettavasti ennustaa tulevia jääkuormia, jopa neljä tuntia eteenpäin.

Avainsanat jääkuorma, kuormitusamplitudi, jääolosuhteet, operatiivinen jääkuorma-monitorointi, ennustemalli, tilastollinen mallintaminen, todennäköisin ääriarvo

Author Ida Lemström

Title of thesis Investigation of ice load prediction models concerning operative ice load monitoring

Degree programme Mechanical Engineering

Major Marine Technology

Code K3005

Thesis supervisor Professor Pentti Kujala

Thesis advisors Ville Valtonen M.Sc., Mikko Suominen M.Sc.

Date 28.11.2016

Number of pages 81

Language Finnish

Abstract

There are often two very conflicting priorities in shipping operations, safety and efficiency. In order to optimize these, an operative short term ice load monitoring system can be applied. When installed, the system provides the ship's crew with real time information on the future ice loads and on the associated damage risk. The future ice loads are estimated based on the measured ice loads and, since the nature of ice loads is stochastic, the prediction is dealt with by statistical methods.

In this thesis, different statistical prediction models for short term ice load monitoring are studied. The predictions are made by estimation of the most probable maximum ice loads on the ship hull, using exponential, Weibull, Gumbel I and Gumbel II distributions. In addition, three methods based on the scaling properties of the observed ice loads developed by Mikko Lensu are studied. These are referred to as Lensu's Gumbel I, Lensu's Gumbel II and Lensu's superposition method. The analyzed data was measured onboard the Polar Supply and Research Vessel S.A. Agulhas II during its full scale trial to the Bay of Bothnia in March 2012.

The main objective of this work is, based on the measured data, to find the most suitable short term prediction model for an operative ice load monitoring system. Furthermore, the objective is to establish, how far in the future it is possible to rather reliably predict future ice loads and how long the observation period should be in order to produce the most accurate ice load prediction. When calculating the ice load prediction, the ice conditions and ship speed are considered as constants. Studies in short term ice load prediction of this extent have not been conducted earlier.

The suitability of the statistic distribution models for short term ice load prediction, is studied by comparison of the predicted most probable ice load maxima and the measured maxima of both the observation period and prediction periods of varying length. All three of the Lensu's methods were found more suitable for short term ice load prediction purposes than the exponential, Weibull, Gumbel I or Gumbel II distributions. Based on the graphical observations and the error measures of the calculated predictions, Lensu's Gumbel II prediction model was identified as the most appropriate measure for an operative ice load monitoring system. The most accurate prediction was obtained while the observation period was as long as possible and the prediction period as short as possible. On the basis of prediction error values and graphical analysis, it was found that using observation periods of 60, 90 and 120 minutes, fairly accurate ice load predictions can be generated for a prediction period up to four hours.

Keywords ice load, peak amplitude, ice conditions, operative ice load monitoring, prediction model, statistical modeling, most probable extreme value

Esipuhe

Tämä diplomityö on pitkän ja antoisan opiskeluaikani viimeinen ponnistus, josta haluan kiittää kaikkia niitä ihmisiä, jotka minua ovat auttaneet. Haluan kiittää tämän diplomityön toimeksiantajaa ja rahoittajaa Aker Arctica mahdollisuudesta tehdä tämä työ erittäin mielenkiintoisesta ja haastavasta aiheesta. Suuren kiitoksen ansaitsee myös työn ohjaajaa DI Ville Valtonen, jonka asiantuntemus ja neuvot ovat opastaneet minua koko kirjoitusprosessin ajan, etenkin tilanteissa, joissa työssä eteneminen tuntui erityisen haastavalta. Lisäksi haluan kiittää työn valvojaa Pentti Kujalaa sekä työn toista ohjaajaa DI Mikko Suomista, jotka ovat antaneet työn kirjoittamiseen akateemista näkemystä ja joiden kommentit ovat auttaneet minua keskittymään olennaiseen.

Suuri kiitos rakkaalle perheelleni kaikesta opiskelujeni aikana saamastani tuesta sekä ystävilleni, jotka ovat tehneet opiskeluaikastani ikimuistoista. Lopuksi haluan kiittää Tommia, jonka kannustus, kärsivällisyys ja tuki ylitse muiden auttoi minua saattamaan työni päätepiteeseen.

Espoo 28.11.2016

Ida Lemström

Ida Lemström

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	
Abstract	
Esipuhe	
Sisällysluettelo	1
Merkinnät.....	2
1 Johdanto	3
1.1 Tutkimuksen tausta	3
1.2 Tutkimusongelma ja tutkimuksen tavoite	3
1.3 Työn rajausta	4
2 Kirjallisuus ja taustaa.....	6
2.1 Jääkuormat	6
2.2 Jääkuormien mittaaminen	8
2.3 Aikaisemmat jääkuormamittaukset.....	10
2.4 Aikaisemmat jääkuormien tilastomallinnukset.....	12
3 Tutkimusaineisto.....	14
3.1 S.A. Agulhas II	14
3.2 Mittausinstrumentointi.....	14
3.3 Mittausjakso.....	15
3.4 Tietojen esikäsittely	16
4 Tutkimusmenetelmät	19
4.1 Yleistä.....	19
4.2 Kuormitusamplitudien tunnistaminen	19
4.2.1 Kuormitusamplitudimenetelmä	19
4.2.2 Aikaikkunamenetelmä	20
4.2.3 Kuormitusamplitudin tunnistusmenetelmien vertailu.....	21
4.3 Perusjakaumat.....	22
4.4 Ääriarvojakauman määrittäminen tunnetusta perusjakaumasta.....	24
4.4.1 Eksponenttijakauma.....	26
4.4.2 Weibull-jakauma.....	27
4.5 Asymptoottiset ääriarvojakaumat	28
4.6 Lensun menetelmä	30
4.6.1 Skaalauskorrelaatiot.....	30
4.6.2 Skaalauskorrelaatioiden ääriarvojakaumat	32
4.7 Tilastollisten menetelmien soveltuvuus mitattuun aineistoon	34
4.8 Ennustemallin reagointiominaisuudet.....	36
4.9 Havainto- ja ennusteperiodi	36
4.10 Tilastolliset testit.....	37
4.11 Virhearvio	38
5 Tulokset	40
5.1 Tilastollisten jakaumien soveltuvuus mitta-aineistoon.....	40
5.2 Vertailu havaintoperiodin mitattujen maksijääkuormien kanssa.....	43
5.3 Vertailu tulevan ajanjakson maksimien kanssa	56
5.4 Vertailu koko mitatun aikahistorian ennusteen kanssa.....	65
5.5 Lensun ennustemallien aikaikkunan pituuden tutkiminen.....	66
5.6 Riskiparametrin määrittäminen.....	69
6 Johtopäätökset ja yhteenveto	72
7 Lähdeluettelo	77

Merkinnät

a	[kN]	jäykkyysmatriisi
c_w	[-]	Weibull-jakauman parametri
D	[-]	kahden otoksen kumulatiivisen frekvenssin erotus
E	[kN]	Jääkuorman odotettu arvo
F	[kN]	voima
H'	[-]	semilogaritmisen (T, y_T) -kuvaajan kulmakerroin
H	[-]	Hurstin eksponentti
h_c	[m]	laivan rakenteen ja jään välinen kontaktikorkeus
k	[-]	Gumbel II-jakauman parametri
L	[-]	skaalauskorrelaatiokerroin
MAE	[kN]	absoluuttinen keskivirhe
MSE	[kN ²]	keskineliövirhe
m	[-]	kuormitusluokkaan kuuluvien havaintojen lukumäärä
N	[-]	aikaikkunoiden lukumäärä
N_T	[-]	mitattujen kuormamaksimien kokonaislukumäärä
n	[-]	havaintolukumäärä
P_e	[-]	jääkuorman esiintymistodennäköisyys
$p(T)$	[-]	Lensun menetelmän superposition painokerroin
R	[-]	järjestyslukujen summa
$RMSE$	[kN]	keskineliövirheen neliöjuuri
r	[-]	Rayleighin vakio
s	[kN]	otoskeskihajonta
T	[s]	havaintoperiodin pituus
T_0	[s]	aikaikkunan pituus
T_F	[s]	toistumisperiodi
t	[-]	Studentin t-testin testisuure
U	[-]	Wilcoxonin järjestyslukutestin testisuure
u	[kN]	Gumbel I-jakauman parametri
v	[kN]	Gumbel II-jakauman parametri
v_n	[1/s]	kuormitusfrekvenssi
x_0	[kN]	kynnysarvo
x_n	[kN]	yksittäinen kuormitusamplitudi
y_{max}	[kN]	jääkuorman raja-arvo
y_n	[kN]	jääkuorman ääriarvo
$\overline{y_n}$	[kN]	jääkuorman todennäköisin ääriarvo
$\widehat{y_n}$	[kN]	jääkuorman suunnitteluääriarvo
y_T	[kN]	aikaikkunan keskimääräinen maksimiamplitudi
z	[-]	Normaalijakauman standardoitu testisuure
α	[-]	riskiparametri
β	[1/kN]	Gumbel I-jakauman parametri
β_n	[°]	laivan kaaren normaalikulma
γ	[-]	Euler-Mascheronin vakio
γ_a	[-]	leikkausmuodonmuutos
λ	[kN]	Poissonin jakauman parametri
λ_e	[1/kN]	eksponenttijakauman parametri
λ_w	[1/kN]	Weibull-jakauman parametri
μ	[kN]	kuormituspiikkien keskiarvo
σ	[kN]	jääkuorman keskihajonta
σ^2	[kN ²]	jääkuorman varianssi

1 Johdanto

1.1 Tutkimuksen tausta

Laivojen operoinnissa on usein kaksi hyvin ristiriitaista prioriteettia, turvallisuus sekä tehokkuus. Matkustajien sekä aluksen turvallisuuden tulee aina olla taattu samaan aikaan, kun halutaan operoinnista mahdollisimman nopeaa, taloudellista ja luotettavaa. Optimoitaessa turvallisuuden ja tehokkuuden suhdetta, tieto laivan rakenteisiin kohdistuvista kuormista on tärkeässä asemassa. Kuormitustaso kasvaa sääolosuhteiden muuttuessa rajummiksi ja tästä johtuen kyseinen ongelma on merkittävin tarkastellessa jäissä operoivia laivoja, sillä jääkuormat ovat huomattavasti suurempia kuin avovedessä aiheutuvat kuormat. Talvimerenkulku vaatii vahvempia rakenteita, varovaisempaa navigointia sekä kestävämpiä varusteita kaikissa aluksen operointiosa-alueissa. Yksi tapa mahdollistaa turvallinen ja taloudellinen operointi ankarissa jääolosuhteissa, yhdistettynä ihmisen rajoitettuun tietämykseen jään ominaisuuksista ja jääkuormista, on kehittää järjestelmä, jonka avulla voidaan jatkuvasti monitoroida jotakin laivan operoinnin osa-aluetta. Monitoroidun osa-alueen tulee pystyä kuvaamaan aluksen turvallisuustasoa sekä sitä, kuinka paljon tehokkuutta on vielä varaa parantaa. Tällaisena osa-alueena toimii hyvin runkoon kohdistuvien jääkuormien monitorointi, jonka pää tavoitteena on aluksen rungon pysyvien muodonmuutosten tai murtumien välttäminen.

Operatiivisen jääkuormamonitorointijärjestelmän avulla aluksen miehistö saa tietoa suurista kuormista, jotka saattavat vaurioittaa aluksen runkoa. Tiedon avulla voidaan pienentää vaurioriskiä, esimerkiksi välttämällä ankaria jääolosuhteita, valitsemalla reitti uudelleen tai parantaa suorituskkyä, muuttamalla aluksen nopeutta tai kurssia. Jääkuormien monitoroinnin pääasiallinen tavoite on aikaisemmin mitattujen jääkuormien sekä arvioitujen jääolosuhteiden perusteella ennustaa rungon vaurion tai murtumisen todennäköisyyttä. Laivan suorituskkyyn optimoinnin kannalta kiinnostuksen kohteena on ensisijaisesti tulevan, lyhyen aikavälin maksimijääkuorman ennustaminen. Tässä diplomityössä käsitellään menetelmiä, joita voidaan jääkuormia monitoroidessa käyttää aluksen vaurioriskin arvioimiseen ja joiden avulla voidaan ennustaa tulevia lyhyen aikavälin maksimijääkuormia.

Aiemmat aluksiin asennettavat operatiiviset jääkuormamonitorointijärjestelmät ovat näyttäneet ainoastaan vallitsevaa jääkuorman arvoa tai tietyn aikaisemman ajanjakson maksimiarvoa. Tietyn ajanjakson perusteella estimoitu todennäköisin maksimiarvo eli jääkuormaennuste on merkittävästi tehokkaampi keino aluksen rakenteiden vaurioriskin arvioimisen kannalta.

1.2 Tutkimusongelma ja tutkimuksen tavoite

Tässä diplomityössä tutkitaan erilaisia ennustemalleja, joiden avulla on mahdollista ennustaa laivan tulevaa maksimijääkuormaa mitatun jääkuorma-aikahistorian perusteella. Jääolosuhteet sekä jään fyysiset ja mekaaniset ominaisuudet muuttuvat luonnossa jatkuvasti ja niiden vaikuttaessa jään ja laivan rungon väliseen vuorovaikutukseen, runkoon kohdistuvan jääkuormatason suuruusluokka vaihtelee merkittävästi, jopa lyhyellä aikavälillä. Tämän vuoksi jäänmurtoprosessi tunnetaan stokastisena prosessina, jota tulee tutkia tilastollisin menetelmin.

Tilastollisten jakaumien avulla voidaan mitatun jääkuorma-aikahistorian perusteella määrittää todennäköisin maksimi-arvo tietylle ajanjaksolle, joka toimii tässä työssä tulevan ajanjakson jääkuormaennusteena. Aikaisemmat jääkuormiin liittyvät tutkimukset ovat osoittaneet eksponentti- ja Weibull-todennäköisyysjakaumien (Kujala et al. 2009, Kujala ja Vuorio 1985) soveltuvan parhaiten laivan rungon lyhyen ajan jääkuormamittauksiin, kun taas Gumbel I- ja Gumbel II-jakaumia on laajalti tutkittu jääkuormien pitkän ajanjakson ennustamistarkoituksessa (Kujala 1994, Patey 2000). Tässä diplomityössä tutkitaan näiden jakaumien soveltuvuutta jääkuormien lyhyen aikavälin ennustamiseen laivan jääkuormamonitorointitarkoituksessa. Lisäksi tutkimuksen kohteena on Mikko Lensun (Lensu 2002c) kehittämä skaalauskorrelaatioihin perustuva ennustemenetelmä.

Aikaisemmat tutkimukset liittyen jääkuormien tilastolliseen mallintamiseen ovat keskittyneet pääasiallisesti pitkän ajan jääkuormamittauksiin ja jääkuormien pitkän aikavälin ennustamiseen. Lyhyen aikavälin jääkuorman ennustamista tilastollisin menetelmin ei ole aikaisemmin tutkittu tämän työn laajuudella. Lensu (2002c) ja Hänninen et al. (2001) ovat tutkineet Lensun menetelmien jakaumien soveltamista mitta-aineistoon vain yksittäisillä ajanjaksoilla, joiden ei voida olettaa antavan realistista kuvaa ennustemallien luotettavuudesta. Poiketen aikaisemmista tutkimuksista, tässä diplomityössä suoritetaan ensimmäistä kertaa Lensun menetelmien ja muiden tilastollisten mallien ennusteiden välistä vertailua.

Tämän diplomityön päätavoite on selvittää, mikä käsiteltävistä tilastollisista ennustemalleista soveltuu mitta-aineistoon parhaiten sekä määrittää kuinka pitkä ennusteen laskentaan käytettävän ajanjakson tulisi olla, jotta ennuste olisi mahdollisimman luotettava. Lisäksi tutkitaan, kuinka pitkälle tulevaisuuteen jääkuormia voidaan kohtalaisen luotettavasti ennustaa.

Ennustemallin on tarkoitus tulla käyttöön Aker Arctic Technology Oy:n jääkuormamonitorointijärjestelmään, joka toimii ennustavana työkaluna laivan miehistölle. Ennustemallin avulla lasketaan todennäköisyys, jolla tuleva ennustettu maksimijääkuorma ylittää tietyn riskitason, olettaen, että jääolosuhteet ja operointitapa pysyvät vakioina. Kommentosillalla oleva ruutu ilmoittaa miehistölle aluksen vaurioriskitason liikennevalotyypillisesti, näyttämällä vihreää valoa ennustetun todennäköisyyden ollessa hyväksyttävä, keltaista valoa ennustetun todennäköisyyden noustessa kohtalaiseksi ja punaista valoa ennustetun todennäköisyyden eli vaurioriskin ollessa merkittävä, jolloin operointitapaa muutettava, pienentämällä laivan nopeutta tai suunnittelemalla reitti uudelleen. Näin aluksen miehistö voi optimoida aluksen suorituskäytön, vaurioriskin kasvamatta liian suureksi.

1.3 Työn rajaus

Tulevien jääkuormien tarkka ennustaminen vaatii laajaa tietoa jääolosuhteista ja jään ominaisuuksista sekä niiden yhdistämistä aluksen nopeuteen ja jääkuormatasoon. Olemassa oleva tieto jääolosuhteiden, jään ominaisuuksien, laivan nopeuden sekä jääkuormien yhteydestä on vähäistä ja tästä johtuen laskettaessa jääkuorman ennustetta, tässä diplomityössä oletetaan vallitsevien jääolosuhteiden jatkuvan yhdenmukaisina ja aluksen nopeuden pysyvän vakiona, jolloin jääkuorma- ja nopeusaikahistorian tilastolliset ominaisuudet eivät johdu aluksen jääkentän sijainnista. Oletus ei kuitenkaan koskaan pidä täysin paikkaansa, joten tässä diplomityössä pidetään riittävänä sellaista jää-

kuorman ennustemallia, joka pystyy suuntaa-antavasti ennustamaan jääkuorman tulevaa maksimiarvoa. Jääkuormia tutkitaan ainoastaan tilastollisena ilmiönä. Näin ollen, ennusteen tarkoitus on auttaa laivan miehistöä ymmärtämään, mitkä jääolosuhteet ja toimintatavat liittyvät suuriin jääkuormiin ja miten kuormat reagoivat laivan nopeuden muutoksiin.

Ennustemallien tutkimista varten käytetään Etelämantereelle tarkoitetun tutkimus- ja huoltoaluksen S.A. Agulhas II:n Perämeren koematkan mitta-aineistoa, joka on mitattu melko vakioissa jääolosuhteissa. Jääkuormia on aluksella S.A. Agulhas II mitattu sekä kaarilla että laidoituslevyillä laivan keulassa, keulan olkapäässä ja perän olkapäässä. Tässä diplomityössä rajataan jääkuormien analysointi vain aluksen keulan poikittaisille kaarille kohdistuviin kuormiin, sillä suurimmat kuormat esiintyvät yleensä laivan keulassa. Voidaan kuitenkin olettaa jääkuormien käyttäytyvän samalla tavalla myös aluksen muissa osissa.

2 Kirjallisuus ja taustaa

2.1 Jääkuormat

Jääkuorma on jäissä kulkevaan laivan rakenteisiin kohdistuva voima, joka syntyy laivan ja jään välisen vuorovaikutuksen johdosta. Jääkuormia muodostuu, kun laivan liikkeet saavat aikaan jään murtumista, upotusta tai jään liukumista runkoa vasten. Jääkuormaan ja kuormitusfrekvenssiin vaikuttavat muun muassa jääolosuhteet, laivan nopeus ja rungon muoto. Jääkuormia muodostuu lukuisissa erilaisissa tilanteissa, joissa laiva ja jää ovat vuorovaikutuksessa keskenään. Kujalan ja Riskan (1990) mukaan, kuusi merkittävintä jääkuormia aiheuttavaa tilannetta ovat

- Laivan törmäminen suoraan paksuun jäähän
- Laivan törmäminen vinosti jään reunaan
- Laivan kulku tasaisessa jäässä
- Laivan kulku valliintuneessa jääkentässä
- Laivan kulku vanhassa laivarännissä
- Laivan kiinnijuuttuminen puristavaan jäähän.

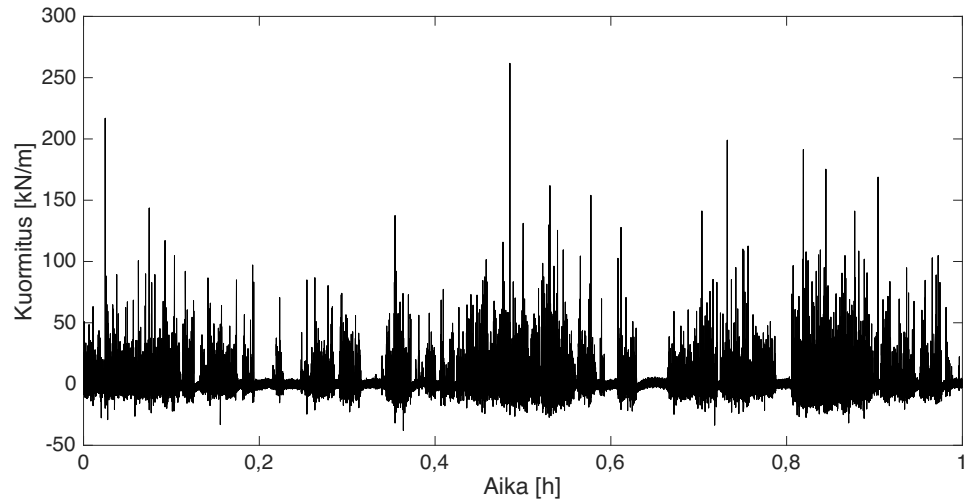
Suurimmat kuormat esiintyvät yleensä laivan keulassa, sillä keula osuu usein ehjään jäähän, laivan perään harvoin kohdistuessa suuria kuormia, koska perä ei yleensä osallistu itse jäänmurtoprosessiin. Jääkuormamittaukset aluksella MS Kemira osoittavat, että suurimmat kuormat laivan keulassa syntyivät laivan liikkuessa valliintuneessa jääkentässä. Sen sijaan suurimmat laivan keskiosaan ja perään vaikuttavat voimat esiintyivät rungon osuessa rännin reunaan laivan kääntyessä jyrkästi. (Kujala 1994)

Jäissä kulku aiheuttaa laivan rakenteille normaaleja avovesikuormia suurempia kuormia. Tieto jääkuormien suuruuksista ja esiintymistaajuuksista on tärkeää, sillä nämä vaikuttavat oleellisesti laivan vaurioriskiin. Mitä suuremmat jääkuormat ovat ja mitä tiheämpi ilmestymistaajuus suurille kuormille on, sitä suuremmaksi kasvaa aluksen rakenteiden vaurioriski. (Lensu 2002a)

Avovesikuormia pystytään nykyään melko tarkasti ennustamaan aaltospektrimenetelmällä, jossa meren aallokkoa kuvaillaan aaltospektrillä, merkittävän aaltokorkeuden ja aaltoperiodin avulla. Muodostamalla kuvaus jääolosuhteista ja liittämällä tämä laivan runkoon kohdistuviin jääkuormiin, mahdollistuisi samankaltaisen menetelmän kehittäminen jäissä kulkeville laivoille. Jääolosuhteiden kuvaamista aaltospektrimenetelmän tapaan on yritetty, mutta jääpeitteen monimutkaisuuden takia järkevää menetelmää ei ole löydetty. Jääolosuhteiden kuvaaminen edellyttäisi tietoa jään mekaanisista ja fysikaalisista ominaisuuksista, jotka voivat paikallisestikin vaihdella merkittävästi (Suominen et al. 2015a). Jään ominaisuuksien lisäksi jäänmurtoprosessiin vaikuttavat laivan operointitapa (liikkeet ja nopeus) sekä laivan parametrit, johtaen jääkuormien suuruusluokan merkittävään vaihteluun, jopa lyhyen ajan jääkuormamittauksissa. (Suominen ja Kujala 2014)

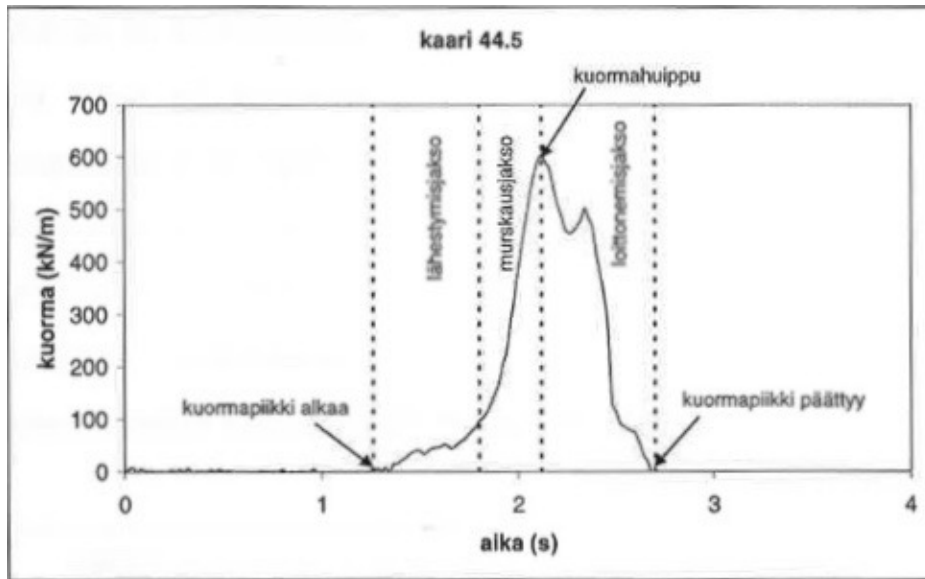
Kuvassa 2.1 on esitetty jääkuormamittaukselle tyypillinen aikahistoria laivan navigoinnista jäissä. Kuten kuvasta nähdään, kuormitusprosessi koostuu erillisistä piikeistä, jotka kuvaavat jääreunan törmäystä laivan runkoon. Jokaisella jääkuormitustapauksella on tietty kesto, joka yleensä vaihtelee millisekunnista sekunteihin. Jääkuormia

tarkkaillessa tärkeimpiä on yleensä piikkien huippuarvot, eli jäänmurtoprosessin aikana vaikuttavat maksimivoimat. Kuten kuvasta 2.1 nähdään, kuormituspiikit eivät jakaudu tasaisesti, vaan jakautumisen aikahistorialle on todettu olevan stokastinen ja sen vuoksi jääkuorman määrittämisessä täytyy ottaa huomioon myös prosessin tilastollisuus. Jääkuormien tilastollisissa analyysissä luodaan laivalla tehtyjen jääkuormamittausten avulla jäänmurtoprosessista tilastollinen malli, jolla voidaan ennustaa tulevia äärikuormia. Mittatuloksia käytetään myös mallien validoinnissa. Laskettaessa mitoitus- ja äärikuormia tilastollisten menetelmien avulla vaaditaan laajaa tietokantaa ja ymmärrystä prosessin tilastollisesta ja fysikaalisesta luonteesta. (Riskä 2011)

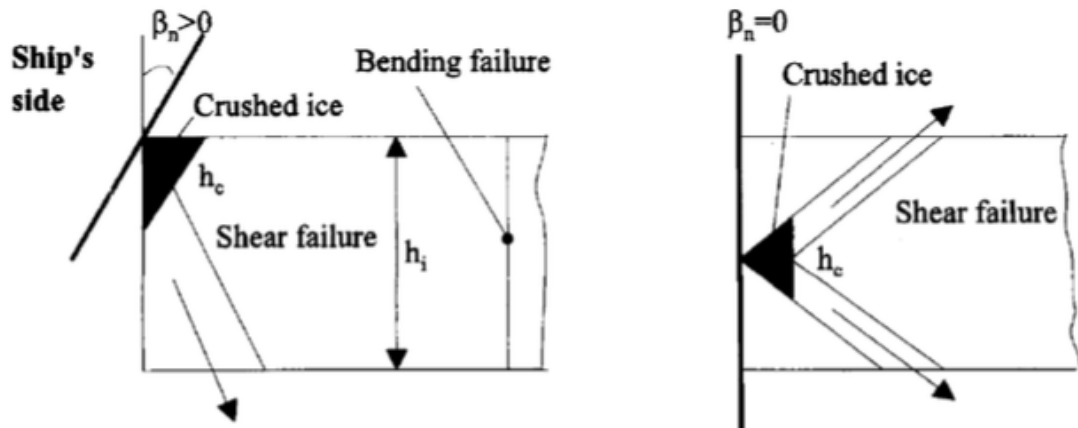


Kuva 2.1 Tyypillinen aikahistoria jääkuormitukselle.

Tarkkailtaessa jääkuormitusaikahistoriaa tarkemmin, yksittäinen kuormituspiikki koostuu eri vaiheista, kuten kuvasta 2.2 voidaan havaita. Suurimmat kuormituspiikit syntyvät laivan murtaessa jättä, jolloin kuormitustilanne voidaan jakaa kolmeen osaan: lähestymisjakso, murskausjakso ja loittonemisjakso. Lähestymisjakso alkaa, kun voima lähtee kasvamaan. Tässä vaiheessa jää ei vielä ole kontaktissa mitattavan rungonosan kanssa, vaan voima heijastuu rungon lähellä olevista rakenteista. Murskausjaksossa laivan runko tunkeutuu jäähän ja murskausprosessin edetessä jääkuorma kasvaa kontaktipinta-alan kasvaessa. Jääkuorma saavuttaa maksimiampplitudinsa, kun jäälautta lähtee liikkeelle tai murtuu. Jää voi murtua, joko taivutuksessa tai murskauksessa. Jäänmurtoprosessiin ja näin ollen jääkuormiin vaikuttavat jään mekaanisten ominaisuuksien lisäksi laivan rungon muoto. Jää murtuu taivuttamalla, kun kaaren normaalikulma β_n kasvaa ja kontaktikorkeus h_c pienenee ja vastaavasti normaalikulman ollessa pienempi jää murtuu murskaamalla. Laivan kyljen ollessa pystysuora jää murtuu vain murskaamalla. Kuvassa 2.3 on esitetty eri jäänmurtoprosessit. Loittonemisjaksossa jää on jo murtunut, lähtenyt liikkeelle tai ohittanut kontaktipisteen rungonosan kanssa, jossa mittausta suoritetaan. Voima, joka on tässä vaiheessa havaittavissa, on yleensä heijastus lähellä oleviin rungonosiin kohdistuvista voimista. Kuormituspiikki päättyy, kun voiman vaikutus lakkaa. (Hänninen 2002, Kotilainen 2014, Kujala 1994)



Kuva 2.2 Jäänmurtoprosessin eri vaiheet. (Hänninen 2002)



Kuva 2.3 Jään eri murtumisprosessit. (Kujala 1994)

2.2 Jääkuormien mittaaminen

Tietoa jääkuormista ja niiden luonteesta saadaan parhaiten selville mittaamalla alukseen kohdistuvia jääkuormia täydessä mittakaavassa. Jääkuormia mitataan yleensä jäänmurtaajista tai jäissä kulkevista kauppalaivoista. Mittalaitteisto ja rungon osat joille mittaukset suoritetaan vaihtelevat riippuen siitä, mihin mitta-aineistoa on tarkoitus käyttää. Jääkuormamittauksen tarkoitus voi olla esimerkiksi kerätä tietoa jäänmurtoprosessista ja siinä esiintyvistä paineista tai yksinkertaisesti aluksen onnistuneen mitoituksen toteaminen. (Suominen et al. 2015a)

Yksinkertaisin tapa suorittaa jääkuormamittauksia on mitata jääkuormien aiheuttamia rungon muodonmuutoksia venymäliuska-antureilla, joiden toiminta perustuu resistanssin muutoksen mittaamiseen. Laivan kaarijärjestelmään tai niiden välillä oleviin laidoituslevyihin liimataan mittauksia varten venymäliuskoja, jotka venyvät ja puristuvat kokoon kiinnitysalustan muodonmuutosten mukana. Mittaamalla jännitteen muutosta, joka muuttuu resistanssin muuttuessa, saadaan selville kiinnitysalustan venymä tai

puristuma. Jääkuorma, joka tarvitaan aiheuttamaan mitattu muodonmuutos, voidaan tämän jälkeen arvioida lujuusopin kaavojen avulla. (Kujala ja Riska 2010)

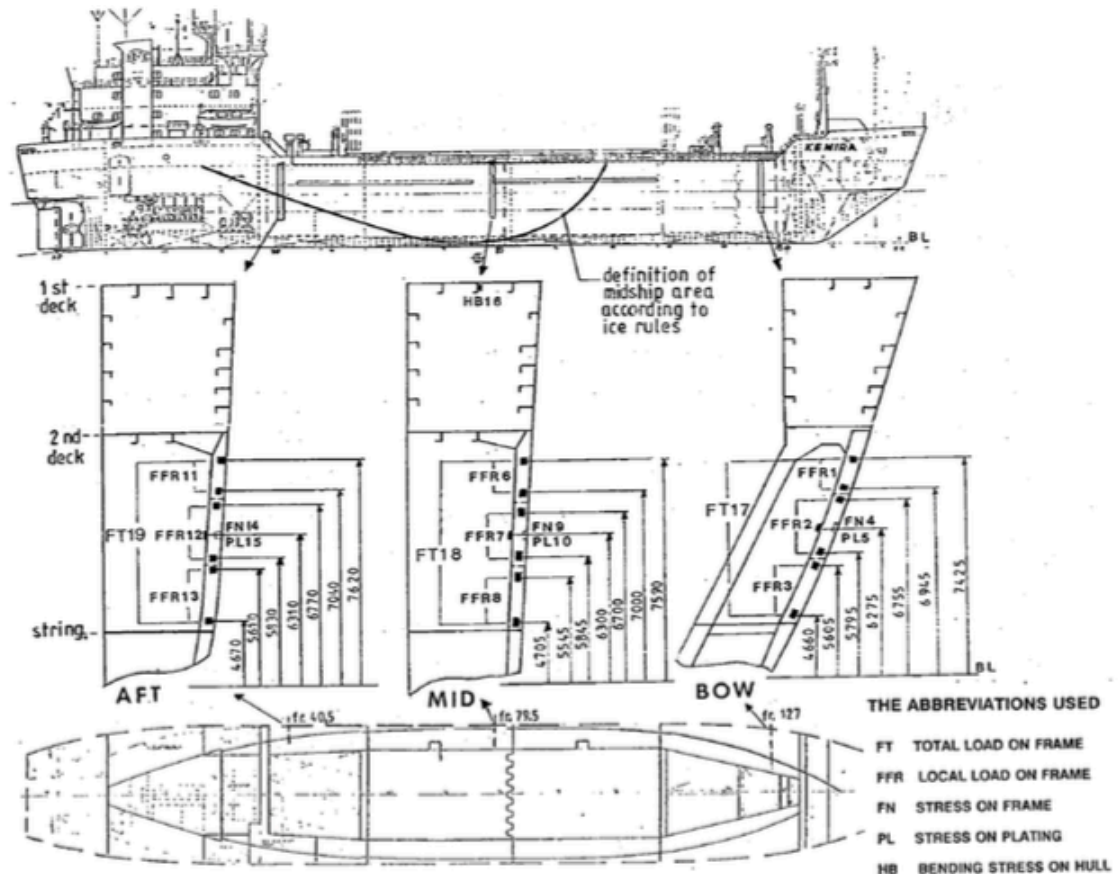
Myöhemmin on kehitetty leikkausliuskojen periaate, jota nykyään käytetään lähes kaikissa täysmittakaavaisista jääkuormamittauksista. Tällöin jääkuorma saadaan selville kahden anturin leikkausmuodonmuutoksen erotuksesta. Anturipari asennetaan yleensä laivan poikittaisen kaaren päihin ja antureiden mittaamista leikkausmuodonmuutoksien erotuksista saadaan lujuusopin avulla laskettua kaareen vaikuttava kokonaisvoima. Esimerkki laivan kaarelle asennetusta venymäliuskasta on esitetty kuvassa 2.4. Jääkuorman ja muodonmuutosten välisen riippuvuuden määrittäminen vaatii yleensä monimutkaisuutensa vuoksi instrumentoidun alueen mallinnusta elementtimenetelmällä (FEM) tai kalibrointia koekuormituksella. (Kujala ja Riska 2010)



Kuva 2.4 Yksi kaaren venymäliuskoista alukselta Baltika. (VTT 2014)

Jääkuormien mittaamiseen on myös käytetty laivan ulkopuolelle liimattavia paineanturilevyjä, joiden avulla pääsääntöisesti mitataan kuorman geometriaa ja painejakaumaa. On myös tavallista yhdistellä erilaisia mittaustapoja. (Lensu 2002c)

Jääkuormamittauksia voidaan suorittaa laivan eri rungonosille. Joskus jääkuormamittauksissa keskitytään aluksen keulaan ja venymäliuskoja asennetaan usealle eri keulakaarelle, kun taas toisinaan jääkuormia mitataan samanaikaisesti monesta eri rungonosasta. Kuvassa 2.5 esitetään MT Kemiran jääkuormamittausjärjestelmä, jossa venymäliuskoja on asennettu rungon keulaan, keskiosaan ja perään. (Suominen et al. 2015a)



Kuva 2.5 MT Kemiran jääkuormamittausjärjestelmä. (Kujala 1989)

Jääkuormia voidaan mitata joko lyhyellä tai pitkällä aikatahtaimella. Lyhyen aikatahtaimen jääkuormamittauksissa on nauhoitettu koko aikahistoria, jolloin kaikki kuormapiikit ovat ajan suhteen tarkasteltavissa. Tätä menetelmää käytetään lähes kaikissa tuoreimmissa mittauksissa. Pitkäaikaismittauksille oli aikaisemmin tavanomaista, että järjestelmä tilastoi vain mitattujen kuormien aikahistorian maksimi-arvoja. (Kujala ja Riska 2010)

2.3 Aikaisemmat jääkuormamittaukset

Kaikki julkisesti tiedossa olevat jääkuormamittaukset vuoteen 2015 mennessä on listattu ISSC komitean raportissa (2015), kun taas Daley ja Riska (1990) esittävät tiivistelmän kaikista vuoteen 1990 mennessä suoritetuista suorista jääkuormamittauksista. Aluksi mittausten tavoite oli sovittaa tilastollinen jakauma mitatuille kuormille, jonka avulla pystyttäisiin arvioimaan aluksen runkoon vaikuttavien suurten, vaurioita aiheuttavien kuormien todennäköisyys.

Ensimmäiset yritykset suoriin jääkuormamittauksiin tehtiin Neuvostoliitossa vuonna 1963, kun moottorilaivaan Olenegorsk asennettiin 40 venymäliuskaa, jolloin todettiin jääkuormien aiheuttamien paikallisten jännitysten rungon laidoituslevyissä seuraavan eksponenttijakaumaa (Likhomanov in Kheysin ja Popov 1973). Pohjois-Amerikassa samankaltaisten mittausten tekeminen aloitettiin asentamalla mittalaitteistoa tankkeriin Manhattan vuonna 1969 ja myöhemmin 1970-luvulla jääkuormia yritettiin määritellä suorittamalla jääkuormamittauksia usealla kanadalaisella ja yhdysvaltalaisella rannikko-

vartioston jäänmurtajalla sekä rahtialuksella MV Arctic (Levine et al. 1973, German ja Milne 1973, Edwards et al. 1981). Kaikissa mainituissa tapauksissa määriteltiin pohjimmiltaan paikallista jännitystä ja varsinaisten jääkuormien arvioimisessa jouduttiin tekemään runsaasti oletuksia jään ominaisuuksiin liittyen (Daley ja Riska 1990).

Ensimmäiset suorat yritykset jääpaineen mittaamiseen toteutettiin aluksella MT Igrim vuonna 1978 ja tämän jälkeen aloitettiin ensimmäiset arktisen alueen jääpainemittaukset aluksella Louis S. St. Laurent vuonna 1980 (Korri ja Varsta 1979, Glen et al. 1981). Kanadalaiseen jäänmurtajaan Kigoriak asennettiin vuonna 1981 mittausjärjestelmä, jonka avulla jääkuormat saatiin selville leikkausmuodonmuutoksen erotuksesta kaarissa. Kigoriakiin asennetun mittausjärjestelmän avulla oli mahdollista arvioida jääkuormia usean neliömetrin kokoiselta alueelta (Dome 1982). Vuonna 1982 jäänmurtajalle USCGC Polar Sea asennettiin 80 venymäliuskaa yhteensä kymmenelle vierekkäiselle kaarelle mahdollistaen jääpainemittaukset entistä suuremmalta alueelta. Alukseen asennettu mittausjärjestelmä pystyi välittömästi muuntamaan venymälukemat jääpaineiksi (Daley et al. 1984). Saksalaiseen tutkimusalukseen Polarsterniin asennettiin vuonna 1984 ulkoiset punnituskennot, jotka kykenivät mittaamaan sekä tangentiaali-että normaalikuormaa (Hoffman 1985). Polarsternillä mittauksia on suoritettu kahteen otteeseen, vuosina 1984-1985 sekä vuonna 2002 (ISSC committee 2015). Lisäksi huoli pienten alusten kelpoisuudesta jäissä liikkumiseen johti jääkuormamittauslaitteiston asentamiseen kanadalaiselle kalastustroolarille Cape Brierille (Daley et al. 1988).

Vuosina 1991 ja 1996 ruotsalaisella jäänmurtajalla Odenilla suoritettiin jääpaine-mittauksia Arktikassa. Vuoden 1991 mittaukset todistivat huomattavan korrelaation laivan nopeuden ja paikallisen jääpaineen välillä (Frederking 2005). Yhdysvaltalaisella jäänmurtajalla USCGC Healyllä suoritettiin jääkuormamittauksia Arktikassa keväällä 2000. USCGC Healyn mittauksissa jääolosuhteita havainnoitiin tarkasti, ja jääkuormien lisäksi laivan operointiin liittyvät tiedot tallennettiin laajasti. Mittalaitteisto koostui kymmenestä leikkausliuskaparista, jotka jakautuivat kymmenelle kaarelle. Hänninen et al. (2001) on raportoinut aluksen jääkuormista ja mittalaitteistosta. Vuonna 2012 valmistuneella S.A. Agulhas II aluksella on usean vuoden aikana suoritettu jääkuormamittauksia sekä Itämerellä että Etelämantereella. Alukseen asennettiin rakennettaessa venymäliuskoja usealle kaarelle keulaan, keulan olkapäähän ja perän olkapäähän sekä niiden välisille laidoituslevyille. S.A. Agulhas II:n mittauksia ovat analysoineet Suominen et al. (2013). Lisäksi jääkuormamittauksia on suoritettu muun muassa aluksilla RV Akademik Feodorov (1991 ja 1994), Newark (1999), Kapitan Sorokin (1991), JM Teshio (1998 ja 1999) sekä KV Svalbard (2007) (ISSC committee 2015). Aker Arctic Technology (AARC) on myös suorittanut useita jääkuormamittauksia, joista mainittakoon mittaukset vuonna 2014 rakennetulla maailman ensimmäisellä vinomurtajalla Baltikalla (VTT 2014).

Suomalaisissa jääkuormamittauksissa on keskitytty pitkäaikaiseen jääkuormamonitorointiin. Tietoja jääkuormista on pääasiallisesti käytetty rakenteiden suunnitteluun, vaurioriskin arvioimiseen ja luokitusjärjestelmän sekä jääsääntöjen laatimiseen. Tärkeimmät pitkäaikaista jääkuormamonitorointia varten instrumentoidut suomalaiset alukset ovat JM Sisu, MS Kemira ja MT Uikku.

Jäänmurtaja Sisu rakennettiin vuonna 1975 ja alukseen kohdistuvia jääkuormia on mitattu vuosina 1978-1985. Ensin instrumentoitiin aluksesta kaksi kaartaa paikallisen jääpaineen ja paikallisen jännityksen määrittämiseksi. Mittaukset osoittivat, että paine-jakauma kontaktipinta-alalla ei ole vakio. Mitattujen jääkuormien päivän maksimit

sovitettiin Gumbel I-ääriarvojakaumaan, jonka todettiin sopivan hyvin suurimpaan osaan mitta-aineistosta, mutta aliarvioivan suurten kuormien tiheyden. Mittalaitteistoa laajennettiin vuosina 1982-1984 ja lopullisessa mittajärjestelmässä oli neljä paineanturia ja neljä venymäliuskaa laidoituslevyissä, kolme venymäliuskaa kaarten laipoissa, yksi leikkausliuska stringerissä sekä 22 leikkausliuskaa yhteensä kymmenen kaaren uumissa. Jääkuormamittauksissa kerätyt huippuamplitudit osoittautuivat seuraavan eksponenttijakaumaa lyhyillä näytteenottoperiodeilla, kun pitkäaikaisten päivittäisten maksimien sovittamiseen oli mahdollista käyttää sekä Gumbel I- että III-jakaumia. JM Sisun mittalaitteista ja jääkuormamittauksista ovat raportoineet Vuorio et al. (1979), Riska et al. (1983), Varsta (1983) sekä Kujala ja Vuorio (1986).

Vuonna 1980 rakennetulle kemikaalitankkerille MS Kemiralle suoritettiin jääkuormamittauksia vuosina 1985-1991. Jääkuormia mitattiin kolmelta kaarelta laivan keulasta, keskilaivasta ja perästä. Jokaiselta kaarelta mitattiin jääkuormia leikkausliuskaparien avulla kolmesta eri kohtaa. Tämän lisäksi kaarille asennettiin venymäliuskat ja myös vierekkäisten laidoituslevyjen jännitykset mitattiin venymäliuskojen avulla. Vuonna 1990 instrumentoitiin vielä neljäs kaari konehuoneen kohdalta. Päivittäisten jääkuormamaksimien todettiin seuraavan Gumbel I-jakaumaa. Jakauma kuitenkin aliarvioi suurten kuormien todennäköisyydet. Kujala (1989) havaitsi Kemiran mittauksissa myös korrelaation jään paksuuden ja tunnin maksimikuormien välillä. Kemiran mittauksista ovat raportoineet Kujala (1989), Gylden ja Riska (1989) sekä Muhonen (1991,1992).

Vuonna 1976 rakennetulle tankkerille MT Uikku asennettiin vuonna 1998 jääkuormamittalaitteisto, joka koostui 42 venymäliuskakanavasta, joista 34 mittasi jään aiheuttamia kuormia ja jännityksiä aluksen pitkittäisiltä ja poikittaisilta kaarilta sekä laidoituslevyiltä. Venymäliuskoja asennettiin aluksen keulaan, keulan olkapäähän, keskilaivaan ja perään. Mittalaitteisto oli hyvin laaja ja jääkuormia mitattiin usealla eri menetelmällä. Tärkeimmät jääkuormamittaukset MT Uikulla suoritettiin keväällä 1998 pohjoisella meritiellä. Kotisalo ja Kujala (1998, 1999) analysoivat jääkuormamaksimien tilastollisuutta 20 minuutin ajanjaksoista. Merialueen, jääolosuhteiden ja laivan operointitapojen vaikutusta jääkuormiin tutkittiin. Kujala (1999) sovitti Gumbel I-ääriarvojakauman myös Uikun mitta-aineistoon ja jälleen kerran havaittiin, että suurin osa jääkuormamaksimeista sopii jakaumaan hyvin, vaikkakin jakauma yleisesti aliarvioi suurten kuormien tiheyden.

Muita suomalaisia aluksia, joille on suoritettu jääkuormamittauksia ovat muun muassa JM Urho (vuonna 1976), MT Kashira (vuonna 1984-1990), MS Arcturus (1983-1988) ja JM Otso (2005) (ISSC committee 2015).

2.4 Aikaisemmat jääkuormien tilastomallinnukset

Jäänmurtoprosessin monimutkaisuudesta ja jääolosuhteiden kuvaamisen vaikeudesta huolimatta, laivan runkoon kohdistuvia jääkuormia on menestyksekkäästi tutkittu tilastollisilla menetelmillä, jotka perustuvat täysmittakaavaisiin jääkuormamittauksiin. Tutkimusten perusteella on todettu, että jään ominaisuuksia ja jääolosuhteita sekä jääkuormia voidaan mallintaa todennäköisyysjakaumilla. Ensimmäisen yhteyden jääkuormien ja tilastollisuuden välillä teki Likhomanov (Kheisin ja Popov 1973), kun hän huomasi rungonosaan kohdistuvien törmäysten määrän ajan funktiona noudattavan Poissonin lakia ja jääkuormitusamplitudien olevan sovitettavissa Pearson III-tyyppisen jakauman avulla.

Jordaan et al. (1987) on tutkinut tilastollisten menetelmien soveltamista Arktisten alueiden laivojen suunnittelussa ja kehitti tutkimusten perusteella suunnittelukriteerin arktista merenkulkua varten. Lisäksi Jordaan et al. (1993) määritteli tapaus-maksimi - menetelmän eli tilastollisen menetelmän, perustuen pelkästään mitta-aineiston maksimipaineisiin sekä totesi jääkuormamaksimien todennäköisyysjakauman hännän seuraavan eksponenttijakaumaa. Taylor et al. (2010) jatkoi tapaus-maksimi - menetelmän tutkimista ja toi esille uuden suunnittelukäyrän, joka on myös eksponenttijakauma. Varsta (1984) kehitti menetelmän, jolla päivittäisiä maksimijääpaineita voi mallintaa Gumbel I- tai Gumbel III-ääriarvojakaumilla. Menetelmän ongelmana on kuitenkin sen soveltuvuus vain samanlaisen operointiprofiiliin omaaville laivoille. Kujala (1994) kehitti myöhemmin samankaltaisen menetelmän, jolla laivan eliniän maksimijääkuormaa voi ennustaa sovittamalla mitattuja maksimijääkuormia Gumbel I-ääriarvojakaumaan. Jakauman parametrit määräytyvät jääkuormien keskiarvon ja variaatiokertoimen mukaan. Kujalan menetelmässä jääkuormien keskiarvo on funktio jään ekvivalentista jäänpaksuudesta ja variaatiokerroin on vakio sekä ekvivalentista jäänpaksuudesta riippumaton. Toisin kuin Varstan (1984) menetelmä, Kujalan (1994) menetelmä soveltuu eri tyyppisille laivoille.

Myöhemmät tilastolliset jääkuormatutkimukset ovat osoittaneet, että Weibull-todennäköisyysjakauma (Kujala et al. 2009, Suominen ja Kujala 2010, Suyuthi et al. 2012a,b), eksponentti- tai lognormaalijakauma (Kujala ja Vuorio 1985, 1986, Suominen 2011) soveltuvat parhaiten jääkuormamittauksissa kerättyyn mitta-aineistoon. Lensu ja Hänninen (2003) esittelivät lyhytaikaista jääkuorma-arviointia varten aikaikkuna-menetelmän, jolla kaikkien jääkuormamaksimien tilalle kerätään peräkkäisten aikaikkunoiden maksimit, jolloin kuormitusfrekvenssillä ja kuorman kynnyksarvolla ei ole merkitystä. On myös havaittu, että mitattujen jääkuormien keskiarvojen ja keskihajonnan välillä vallitsee yhteys, jota voidaan kuvailla variaatiokertoimen avulla (Kujala et al. 2009, Suominen 2011, Suominen ja Kujala 2010).

Tilastollisia menetelmiä jääkuormien lyhyen ajan ennustamiseksi eli jääkuorramonitorointimenetelmiä, on tutkinut muun muassa Patey (2000) sekä Lensu (2002c). Patey (2000) valitsi kymmenen aikahistoriaa Uikun kaarten jääkuormamittauksista tutkiakseen jääkuorramonitorointia laivan rungolla. Aikahistoriat vaihtelivat kahdesta tunnista kuuteen tuntiin. Hän käytti lyhyen ajan kuormahistogrammeja, sovitti eri jakaumia mitta-aineistoon ja käytti malleja ennustaakseen kuormia pidemmille ajanjaksoille. Patey (2000) tutki eri standardijakaumien (eksponentti-, lognormaali- ja gammajakauma) sekä Gumbel I-III-ääriarvojakaumien soveltuvuutta mitta-aineistoon. Eksponenttijakauman todettiin tuottavan parhaan tuloksen. Havaittiin jälleen, että Gumbel-jakaumat aliarvioivat suuria kuormia.

Lensu (2002c) kehitti lyhyen ajan ennustemallin, joka validoitiin Uikun jääkuormamittamitta-aineiston avulla. Lensu (2002c) sovitti Uikun jääkuormamaksimeita Gumbel I-III-jakaumiin ja kehitti lopulta menetelmän, jossa Gumbel I- ja II -jakaumat yhdistettiin, jotta Gumbel II -jakauma dominoi pienten kuormien ennustetta ja suurten kuormien ennuste seuraa pääasiallisesti Gumbel I -jakaumaa. Lensun (2002c) ennustemalli perustuu aikaikkuna-menetelmään ja odotetun jääkuormamaksimin skaalaamiseen eri ajanjaksoille.

3 Tutkimusaineisto

3.1 S.A. Agulhas II

Tässä diplomityössä käytettävä mitta-aineisto on kerätty alukselta S.A. Agulhas II. Etelä-Afrikan ympäristöministeriön omistama, vuonna 2012 valmistunut S.A. Agulhas II rakennettiin STX Finlandin Rauman telakalla ja alus on suunniteltu toimimaan tutkimus- ja huoltoaluksena Etelämantereella. Alus kuuluu jääluokkaan PC-5 ja sen jäävahvistus on DNV ICE-10 mukainen. S.A. Agulhas II:n päämitat on esitetty taulukossa 3.1. Aluksen edeltäjä S.A. Agulhas I rakennettiin Japanissa vuonna 1978 ja se poistui käytöstä S.A. Agulhas II:n valmistuessa vuonna 2012. (Suominen et al. 2013)

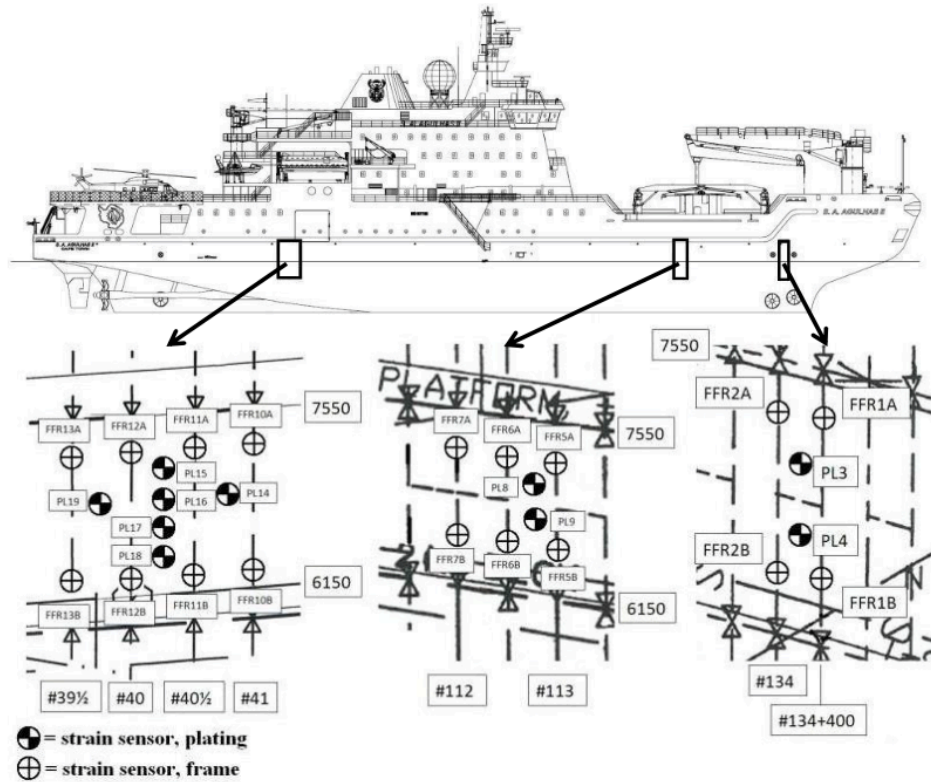
Taulukko 3.1 S.A. Agulhas II:n päämitat.

Kokonaispituus [m]	121,8
Kokonaisleveys [m]	21,7
Syväys [m]	7,65
Uppouma [t]	13 687
Matkanopeus [kn]	14

3.2 Mittausinstrumentointi

Rakennusvaiheessa S.A. Agulhas II:een kiinnitettiin venymäliuskoja kolmeen eri kohtaan laivan vesilinjalle, keulaan, keulan olkapäähän ja perän olkapäähän. Kuten kuvasta 3.1 nähdään, mittalaitteistoa kiinnitettiin kahdelle poikittaiselle kaarelle keulassa (#134,5-#134), kolmelle kaarelle keulan olkapäässä (#113-#112), sekä neljälle kaarelle perän olkapäässä (#41-#39,5). Lisäksi venymäliuskoja asennettiin kaarten välissä oleville laidoituslevyille, kaksi keulaan, kaksi keulan olkapäähän ja kuusi perän olkapäähän. Laivan poikittaisille kaarille asennettu mittalaitteisto koostuu V-muotoisista leikkausmuodonmuutosta mittaavista leikkausliuskoista, vastaavasti laidoituslevyillä venymää mittaavat yksiakseliset venymäliuskat. (Suominen et al. 2015b)

Aluksen kaareen kohdistuvat jääkuormat saadaan selville mittaamalla leikkausmuodonmuutosta kaaren ylä- ja alaosaan. Mikäli rakenteiden mitat sekä ominaisuudet ovat tiedossa, niiden erotuksesta voidaan tämän jälkeen määrittää leikkausjännitys ja leikkausvoima eli jääkuorma. Leikkausmuodonmuutos muunnetaan voimaksi jäykkyysmatriisilla, joka saadaan kalibrointitesteillä ja elementtimenetelmällä (FEM) muodostetun mallin avulla. Laidoituslevyihin kohdistuvat jääkuormat arvioidaan laskemalla jännitys mitatuista normaalivenymistä soveltamalla lujuusoppia. Mittausten näytteenottotiheys on 200 Hz eli venymää mitataan 200 kertaa sekunnissa ja aineisto tallennetaan viiden minuutin aikahistorioihin. (Suominen et al. 2015b)



Kuva 3.1 Aluksen S.A. Agulhas II mittalaitteisto keulassa, keulan olkapäässä ja perän olkapäässä. (Suominen et al. 2013)

3.3 Mittausjakso

Tässä diplomityössä käytettävä mitta-aineisto kerättiin maaliskuussa 2012 S.A. Agulhas II:n koematkalla Perämerellä. Koematka alkoi Raumalta 19. maaliskuuta, mutta lauhkean talven vuoksi vain pohjoinen Perämeri oli tällöin jäässä. Tästä johtuen maaliskuun 21. päivän aamuun asti alus liikkui vain avovedessä. Täten aluksen ensimmäiset jääkuormamittaukset suoritettiin 21. maaliskuuta ja kyseisen päivän jääolosuhteet sekä aluksen reitti ovat esitettynä kuvassa 3.2. Alus palasi yöksi avovesille ja 24. maaliskuuta suoritettiin toinen samankaltainen testipäivä. Koematkan mittaukset olivat laajoja ja aluksen runkoon ja propulsiojärjestelmään kohdistuvien jääkuormien lisäksi aluksella mitattiin rakenteiden värähtelyä, melua, aluksen liikehdintää sekä matkustusmukavuutta. Lisäksi jääolosuhteita estimoitiin visuaalisesti ja jäänpaksuutta mitattiin uuden stereokamerajärjestelmän sekä sähkömagneettisen laitteiston avulla.

$$F = a \cdot \Delta\gamma_a \quad (3.1)$$

missä F on jääkuorma, a on jäykkyysmatriisi ja $\Delta\gamma_a$ on kahden anturin välinen leikkausmuodonmuutoksen erotus. Jäykkyysmatriisi a määriteltiin kalibrointitesteillä ja elementtimenetelmällä (FEM) muodostetun mallin avulla. Käytetyt matriisit ovat

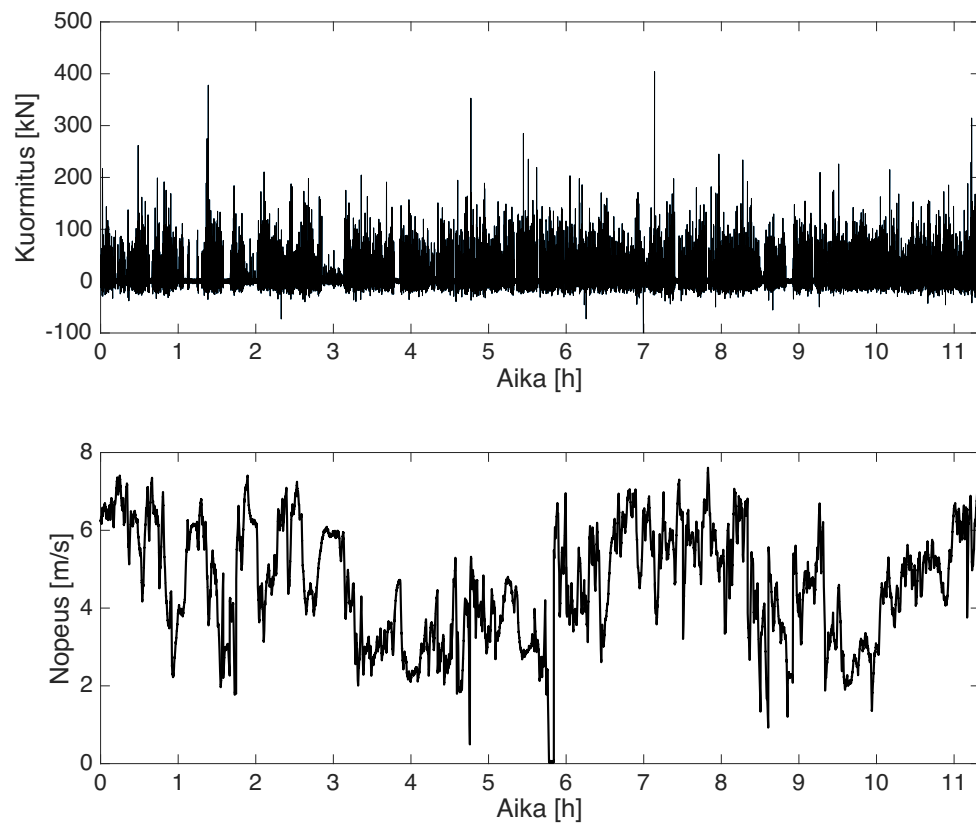
$$a_b = \begin{pmatrix} 1,195 \times 10^6 & -1,255 \times 10^5 \\ -1,859 \times 10^5 & 1,198 \times 10^6 \end{pmatrix} kN \quad (3.2)$$

$$a_{bs} = \begin{pmatrix} 6,292 \times 10^5 & -3,659 \times 10^4 & 1,991 \times 10^4 \\ 1,364 \times 10^4 & 7,452 \times 10^5 & -6,002 \times 10^5 \\ -4,707 \times 10^4 & -3,155 \times 10^5 & 1,558 \times 10^6 \end{pmatrix} kN \quad (3.3)$$

$$a_{ss} = \begin{pmatrix} 2,876 \times 10^5 & 1,021 \times 10^3 & -8,243 \times 10^1 & 2,793 \times 10^2 \\ 5,586 \times 10^3 & 3,341 \times 10^5 & -7,997 \times 10^4 & 1,596 \times 10^4 \\ -3,962 \times 10^3 & -6,984 \times 10^4 & 3,632 \times 10^5 & -6,983 \times 10^4 \\ -1,519 \times 10^3 & 1,276 \times 10^4 & -6,336 \times 10^4 & 3,309 \times 10^5 \end{pmatrix} kN \quad (3.4)$$

Alaindeksit viittaavat rungonosiin keula, keulan olkapää ja perän olkapää. Tässä diplomityössä keskitytään vain aluksen keulan kuormien analysointiin, sillä suurimmat kuormat esiintyvät yleensä laivan keulassa. (Kujala et al. 2014)

S.A. Agulhas II:n Perämeren koematkalta kerätystä 24:n tunnin mitta-aineistosta karsitaan pois ne osat, joissa jääolosuhteet ovat visuaalisten havaintojen taulukon mukaan muuttuneet merkittävästi. Käytetyssä aineistossa ei huomioida niitä kohtia, joissa alus on väliaikaisesti liikkunut avovedessä tai hyvin ohuessa jäässä. Lisäksi osiot, joissa laivan nopeus on ollut erittäin matala tai nopeuden keskihajonta on ollut suuri, jätetään huomioimatta. Lopullisesta mitta-aineistosta on myös karsittu pois osiot, joissa alus on tehnyt manööverikokeita ja kulkenut suurella teholla. Lopullinen kuvassa 3.3 esitetty mitta-aineisto on pituudeltaan 11 tuntia ja 20 minuuttia. Myös nopeuden aikahistoria on esitetty kuvassa 3.3. Jäänpaksuus lopullisen mitta-aineiston aikana vaihteli 10 ja 70 cm välillä ja jään peittoisuus oli pääosin yli 90 %. Jääkenttä oli ajoittain myös valliintunutta.



Kuva 3.3 S.A. Agulhas II:lta mitattu lopullinen 11 tuntia ja 20 minuuttia pitkä jääkuorma-aikahistoria sekä nopeuden aikahistoria.

4 Tutkimusmenetelmät

4.1 Yleistä

Tarkasteltaessa rakenteiden kohtaamia kuormituksia tietyllä ajanjaksolla, voidaan usein todeta kuormitusten noudattavan jotakin tilastollista jakaumaa. Jakaumaan vaikuttavat kuormituksen amplitudi, frekvenssi ja aika. Kun tilastollinen jakauma on tiedossa, voidaan tämän avulla lyhyellä aikavälillä ennustaa todennäköisintä kuormamaksimia tietyllä todennäköisyydellä. Perusjakaumasta saadaan selville ääriarvojakauma olettaen, että samanlaisia kuormitusjaksoja on useita peräkkäin. Mikäli kaikki mitatut kuormat eivät ole tiedossa, vaan ainoastaan perusjoukon kuormamaksimit, käytetään asymptootista ääriarvojakaumaa. Rakennetta mitoitettaessa pyritään siihen, että rakenteisiin kohdistuvat maksimikuormat eivät tämän eliniän aikana hyväksyttävissä olevalla riskitasolla ylittäisi rakenteen kantavuutta. Laskennassa saavutettava tarkkuus riippuu siitä, kuinka virheettömästi rakenteeseen kohdistuvat kuormat sopivat oletettuun perusjakaumaan. Tässä diplomityössä tutkitaan eksponentti-, Weibull-, Gumbel I- ja II-jakaumien sekä Mikko Lensun (Lensu 2002c) kehittämän skaalauskorrelaatioihin perustuvan menetelmän soveltuvuutta jääkuormamitta-aineistoon.

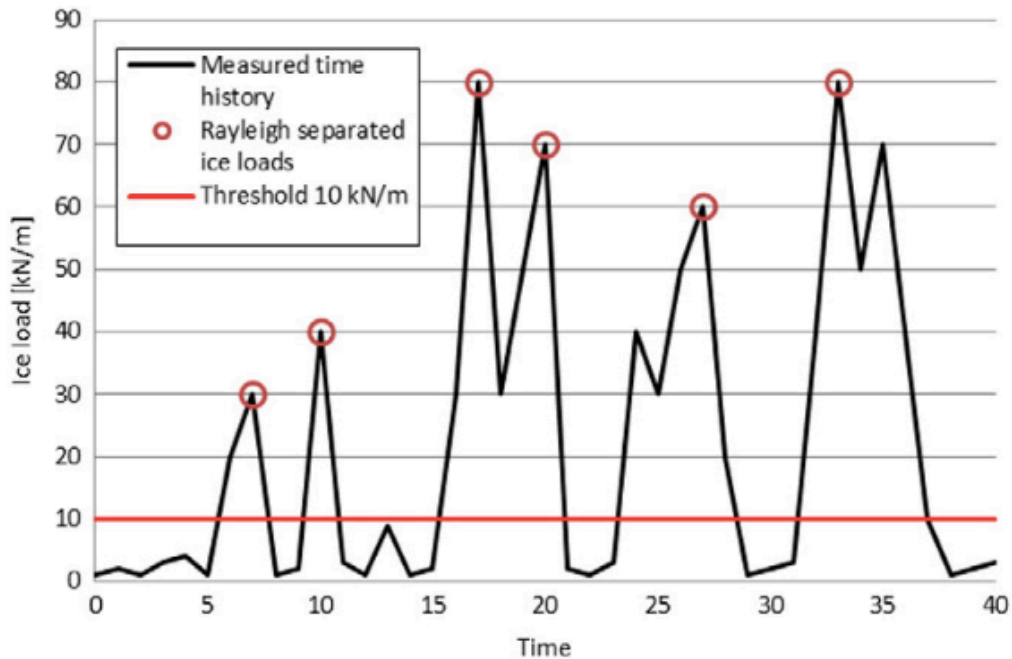
4.2 Kuormitusamplitudien tunnistaminen

Tilastolliset mallit, joita käytetään kuormitusprosessia kuvailtaessa perustuvat pääsääntöisesti kuormituspiikkien amplitudeihin. Kuormitusamplitudien tunnistamiseen voidaan käyttää kahta eri menetelmää. Ensimmäisessä menetelmässä kaikki mitta-aineiston kuormitusamplitudit tunnistetaan aikahistoriasta, jolloin sekä amplitudien suuruuksia että frekvenssiä tulee käyttää niiden analysoinnissa. Toisessa menetelmässä aikahistoria jaetaan tietyn pituisiin osiin eli aikaikkunoihin ja näiden kuormitusmaksimit tunnistetaan mitta-aineistosta. Tämän jälkeen arvioidaan, millä todennäköisyydellä suurin arvo aikaikkunan havainnoista ylittää tietyn kuormitustason.

4.2.1 Kuormitusamplitudimenetelmä

Kuormitusamplitudimenetelmässä koko tarkkailtavan mitta-aineiston kuormitusamplitudit tunnistetaan aikahistoriasta. Tätä varten on oleellista, että kuormituspiikit pystytään erottamaan toisistaan tunnistamisperusteen avulla. Yksinkertaisin tapa erottaa piikit toisistaan on olettaa, että kuormituspiikki alkaa, kun tietty kynnystaso ylitetään ja päättyy, kun se alitetaan. Kuormituspiikin suurinta arvoa kutsutaan kuormitusamplitudiksi. Sopivan kynnysarvon asettaminen on tärkeää, jotta useat eri kuormituspiikit korkeammalla kynnysarvolla eivät laskeudu yhdeksi leveäksi kuormituspiikiksi matalalla kynnysarvolla. Kynnysarvon avulla voidaan mitta-aineistosta tarkastella ainoastaan jääkuormia ja poistaa aaltojen aiheuttamat pienemmät kuormituspiikit. Jotta kynnysarvo ei yksinään määrittäisi mitkä piikit lasketaan kuormitusamplitudeiksi, voidaan lisäksi käyttää Vuorion (1987) esittämää Rayleighin menetelmää. Rayleighin menetelmän mukaan kynnysarvon ylittävien kuormituspiikkien erotus tehdään niin, että kaksi vierekkäistä paikallista kuormitusmaksimia kuuluu eri kuormituspiikkeihin vain, jos niiden välinen minimiarvo on pienempi kuin Rayleighin vakio r kertaa matalampi paikallinen kuormitusmaksimi. Muussa tapauksessa paikalliset kuormitusmaksimit kuuluvat samaan kuormituspiikkiin ja ainoastaan suurempi amplitudi tunnistetaan

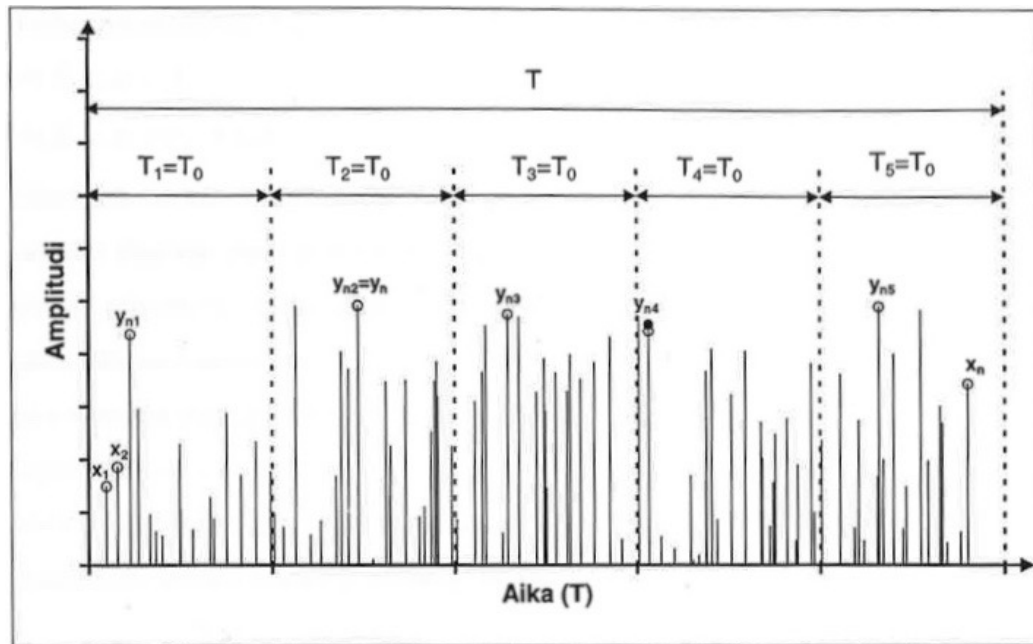
kuormituspiikiksi. Parametri r voidaan valita tutkimalla mitta-aineistoa. Yleisesti käytetty ja toimivaksi todettu r :n arvo on 0,5, jota käytetään myös tässä diplomityössä. Tällä menetelmällä valittuja piikkejä kutsutaan Rayleigh-erotetuiksi. Mikäli käytetään Rayleighin menetelmää, suoritetaan ensin Rayleigh-erotus ja tämän jälkeen säilytetään vain ne piikit, jotka ylittävät valitun kynnysarvon. Kuvassa 4.1 on esitettyä kuvitus Rayleighin menetelmästä ja kynnystason käytöstä. Tässä diplomityössä käytetään kynnysarvoa 10 kN. (Vuorio 1979, Suominen ja Kujala 2014)



Kuva 4.1 Rayleighin menetelmällä erotetut kuormituspiikit r :n arvolla 0,5 ja kynnysarvolla 10 kN/m. Punaiset ympyrät viittaavat aikahistoriasta tunnistettuihin kuormitusamplitudeihin ja punainen viiva viittaa kuormien kynnysarvoon. (Suominen ja Kujala 2014)

4.2.2 Aikaikkunamenetelmä

Aikaikkunamenetelmässä mitta-aineiston aikahistoria jaetaan saman pituisiin aikaikkunoihin, joilla on tietty kesto. Aikaikkunoiden maksimiavot valitaan ja nämä muodostavat kuormitusamplitudiavot, joita tämän jälkeen voidaan analysoida. Myös aikaikkunamenetelmässä kuormitusaineistoon voidaan lisätä kynnysarvo, jos halutaan löytää vain tietyn arvon ylittävät kuormituspiikit. Tässä diplomityössä ei aikaikkunamenetelmässä kuitenkaan käytetä kynnysarvoa. (Lensu 2002a, Lensu 2002c)



Kuva 4.2 Esimerkki aikaikkunamenetelmällä valikoiduista kuormitusamplitudeista. Aikaikkunan pituus on T_0 ja muuttuja y_n esittää aikaikkunoiden maksimiampplitudit. (Hänninen 2002)

4.2.3 Kuormitusamplitudin tunnistusmenetelmien vertailu

Sekä kuormitusamplitudimenetelmässä että aikaikkunamenetelmässä on etunsa ja tilastollisilla malleilla voidaan yhdistää samasta kuormitusprosessista johdetut kuormituspiikkijakaumat sekä aikaikkunajakaumat.

Aikaikkunamenetelmän on kehittänyt Lensu (2002a) ja työssään hän toteaa menetelmällä olevan seuraavat hyvät puolet kuormitusamplitudimenetelmään verrattuna:

- Kuormitusamplitudimenetelmässä käytetään aina kynnyсарvoa lisäparametrina, joka vaikuttaa mitattujen arvojen keskiarvoihin ja piikkiampplitudien jakaumiin. Vaikka vajaan perusjoukon käsittelemiseen voidaan johtaa katkaistut jakaumat, vaikeuttaa kynnyсарvon asettaminen kertymäfunktion sovitusta havaittuihin arvoihin sekä eri mitta-antureilla ja eri jääöloissa mitattujen arvojen vertailua. Aikaikkunamenetelmässä arvot ulottuvat nollaan asti.
- Kuormitusamplitudimenetelmän käyttö edellyttää tietoa kuormituspiikkien frekvenssistä. Myös tämä riippuu kynnyсарvosta, eikä ole tarpeellinen aikaikkunamenetelmässä.
- Lensun (2002a) mukaan kuormitusamplitudimenetelmä vaatii ainakin 100 kuormituspiikkiä kunnes mitta-aineiston histogrammiin voidaan luotettavasti valita sovitettava jakauma. Tämän tuottamiseen tarvitaan tyypillisellä kuormituspiikkifrekvenssillä 0,1 Hz noin 20 minuutin aikahistoria. Aikaikkunamenetelmä mahdollistaa jakauman vapaan valinnan jo todella lyhyiden ajanjaksojen jälkeen.
- Kuormituspiikkien tietyn minimiarvon eli kynnyсарvon olemassaolosta ei ole mitään fyysisiä todistetta. Jään ja rungon välinen kontakti vaihtelee vaikuttavan

jäänosan koon ja ominaisuuksien mukaan ja kauempana vaikuttavat kuormat rekisteröidään matalina piikkeinä.

- Vaikka aikaikkunan pituus T_0 on tilastollinen lisäparametri, voidaan menetelmästä tehdä riippumaton T_0 :n arvosta tekemällä siitä muuttuja. Tällöin voidaan aina verrata eri mitta-antureilla, eri jääolosuhteissa ja eri aluksilla mitattuja arvoja.

4.3 Perusjakaumat

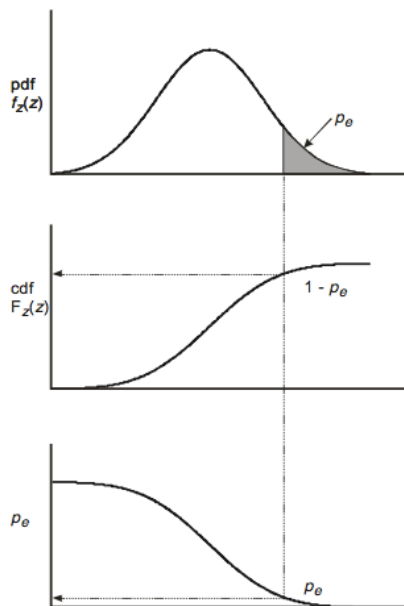
Ajasta riippuvaa kuormitusamplitudia tarkastellaan satunnaismuuttujana, jota merkitään x :llä. Satunnaismuuttujien tilastollisia ominaisuuksia voidaan kuvailla todennäköisyysjakauman avulla. Jakaumia on useita eri tyyppejä ja niiden soveltuvuus tutkitun ilmiön kuvaamiseen riippuu ilmiön ominaisuuksista. Todennäköisyysfunktio $f(x)$ kertoo, kuinka todennäköisiä satunnaismuuttujan eri arvot ovat. Kun on kyseessä jatkuva satunnaismuuttuja, todennäköisyysfunktioa kutsutaan tiheysfunktioksi. Kertymäfunktio kuvaa todennäköisyyttä, että satunnaismuuttuja X ei ylitä arvoa x . Satunnaismuuttujan kertymäfunktio on

$$F(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f(x)dx \quad (4.1)$$

Todennäköisyys, että muuttuja X ylittää arvon x on

$$P(X \geq x) = 1 - F(x) \quad (4.2)$$

Kuva 4.3 havainnollistaa tiheysfunktion, kertymäfunktion ja x :n ylitystodennäköisyyden yhteyden.



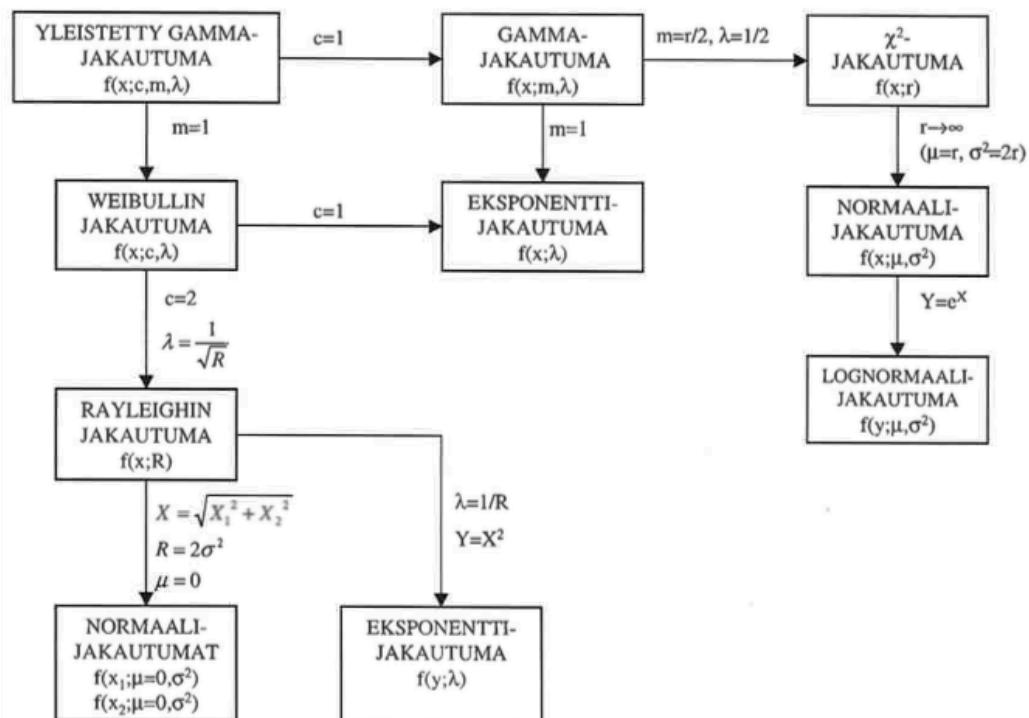
Kuva 4.3 Tiheysfunktion $f(x)$, kertymäfunktion ja x :n ylitystodennäköisyyden yhteys. (Ralph ja Jordaen 2013)

Kun kuormitusamplitudin tunnistuksessa käytetään kynnysarvoa x_0 , täytyy tämä ottaa huomioon jakaumien määrittelyssä. Kynnysarvon mukaan skaalatut todennäköisyys- ja kertymäfunktio saavat muodot

$$f(x; x_0) = \frac{f(x)}{\int_{x_0}^{\infty} f(x) dx} = \frac{f(x)}{1-F(x_0)} \quad (4.3)$$

$$F(x; x_0) = \frac{\int_{x_0}^x f(x) dx}{\int_{x_0}^{\infty} f(x) dx} = \frac{F(x)-F(x_0)}{1-F(x_0)} \quad (4.4)$$

Tilastollisia jakaumia on useita eri tyyppisiä ja erilaiset ilmiöt ja prosessit noudattavat eri jakaumia. Tunnettuja jakaumia ovat esimerkiksi normaali-, eksponentti-, Weibull-, Rayleigh-, lognormaali- ja gammajakaumat. Kuten kuvasta 4.4 voidaan havaita, ovat useat tunnetuista jakaumista parametriensa kautta sidoksissa toisiinsa. (Ochi 1990, Hänninen 2002)



Kuva 4.4 Eri perusjakaumien parametrien yhteydet. (Ochi 1990, muokattu; Hänninen 2002)

Aikaisemmissa tutkimuksissa on todettu, että yleisimmin käytetyistä perusjakaumista eksponenttijakauma (Kujala ja Vuorio 1985, 1986, Suominen 2011, Patey 2000) ja Weibull-jakauma (Kujala et al. 2009, Suominen ja Kujala 2010, Suyuthi et al. 2012a,b) soveltuvat parhaiten jääkuormamittauksissa kerättyyn mitta-aineistoon, jonka vuoksi niitä tarkkaillaan tässä työssä tarkemmin. Kuormituspiikkien frekvenssijakauman eli kuormituspiikkien lukumäärän oletetaan taas yleisesti noudattavan Poissonin jakaumaa (Kheisin ja Popov 1973). Poissonin jakauma ilmaisee todennäköisyyden tapahtuman lukumäärälle tietyllä aikavälillä ja sitä käytetään stokastisesti jakautuneille satunnaismuuttujille. Poissonin jakauma määritellään

$$f(x) = P(X = x) = \frac{\lambda^n e^{-\lambda}}{n!} \quad (4.5)$$

missä λ on jääkuormituspiikkien odotettu arvo ja n on kuormituspiikkien lukumäärä. Poissonin jakauman kertymäfunktio on

$$F(x, \lambda) = \sum_{i=0}^x \frac{\lambda^i e^{-\lambda}}{i!} \quad (4.6)$$

(Haight 1967).

Tilastollisia jakaumia voidaan kuvailla eri parametreilla, joista yleisimpiä ovat keskiarvo, varianssi, keskihajonta, moodi ja mediaani. Tunnetun jakauman $f(x)$ ja otosjoukon (x_1, x_2, \dots, x_n) keskiarvo on

$$\mu = E(x) = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.7)$$

Varianssi eli 2. momentti keskiarvon suhteen on

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 f(x) dx = E(x^2) - E(x)^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2 \quad (4.8)$$

ja keskihajonta σ on varianssin neliöjuuri. Moodi on todennäköisin arvo eli satunnaismuuttujan arvo, jossa todennäköisyysjakauma on maksimissaan. Mediaani on järjestettyjen x :n arvojen keskimäinen arvo. (Ochi 1990)

4.4 Ääriarvojakauman määrittäminen tunnetusta perusjakaumasta

Rakenteiden mitoituksessa on erittäin tärkeää arvioida todennäköisimpiä suurimpia kuormia, jotta rakenteet kestäisivät koko käyttöikänsä. Satunnaismuuttujan suurinta arvoa, jonka odotetaan esiintyvän tietyssä määrässä havaintoja tai tietyssä ajanjaksossa kutsutaan ääriarvoksi. Oletuksena on, että kuormitusfrekvenssi on vakio. Kun tämä on tiedossa, ääriarvon tilastollinen jakauma voidaan johtaa perusjakaumasta. Perusjoukon (x_1, x_2, \dots, x_n) tiheysfunktion ollessa $f(x)$, kertymäfunktion ollessa $F(x)$ ja jokaisen yksittäisen perusjoukon satunnaismuuttujan X_1, X_2, \dots, X_n ollessa tilastollisesti riippumaton sekä samoin jakautunut kuin perusjoukko, voidaan suurinta odotettua arvoa merkitä $Y_n = \max(X_1, X_2, \dots, X_n)$. Satunnaismuuttujat Y_1, Y_2, \dots, Y_n ovat myös tilastollisesti riippumattomia ja niillä on oma tiheysfunktio, joka voidaan johtaa perusjakaumasta kaavalla

$$g(y_n) = n \cdot f(y_n) \{F(y_n)\}^{n-1} \quad (4.9)$$

missä n viittaa havaintojen lukumäärään. Ääriarvon kertymäfunktio on

$$G(y_n) = P(Y_n \leq y_n) = \{F(y_n)\}^n \quad (4.10)$$

(Ochi 1990).

Kuten on havaittavissa kaavasta (4.10), ääriarvon todennäköisyys on funktio havaintojen lukumäärästä n . Ääriarvojakauman modaaliarvoa, jota merkitään \bar{y}_n :llä, kutsutaan todennäköisimmäksi ääriarvoksi. Tämä on ääriarvo, joka suurimmalla toden-

näköisyydellä esiintyy lukumäärällä n havaintoja. Todennäköisin ääriarvo saadaan funktion $g(y_n)$ derivaatan nollakohdasta

$$\frac{d}{dy_n} g(y_n) = 0 \quad (4.11)$$

Kun $g(y_n)$ sijoitetaan kaavaan (4.11) ja merkitään yhtälön toteuttava arvo \bar{y}_n :llä saadaan

$$\frac{1}{1-F(\bar{y}_n)} = \frac{n-1}{F(\bar{y}_n)} \quad (4.12)$$

Olettaen, että n ja \bar{y}_n ovat suuria arvoja, toteutuu

$$\frac{1}{1-F(\bar{y}_n)} = n \quad (4.13)$$

Kuten aikaisemmin todettiin, todennäköisin ääriarvo \bar{y}_n on tietyssä määrässä havaintoja todennäköisimmin esiintyvä arvo, sillä kyseisellä arvolla tiheysfunktio saavuttaa maksiminsa. Huomattakoon kuitenkin, että ääriarvo Y_n on satunnaismuuttuja ja saattaa hyvinkin ylittää todennäköisimmän ääriarvon. Itse asiassa ylittämisen todennäköisyys on melko suuri. Todennäköisyys voidaan suurelle havaintolukumäärälle arvioida seuraavalla tavalla:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} Pr\{\text{Ääriarvo } Y_n > \bar{y}_n\} = 1 - G(\bar{y}_n) = 1 - e^{-1} = 0,632 \quad (4.14)$$

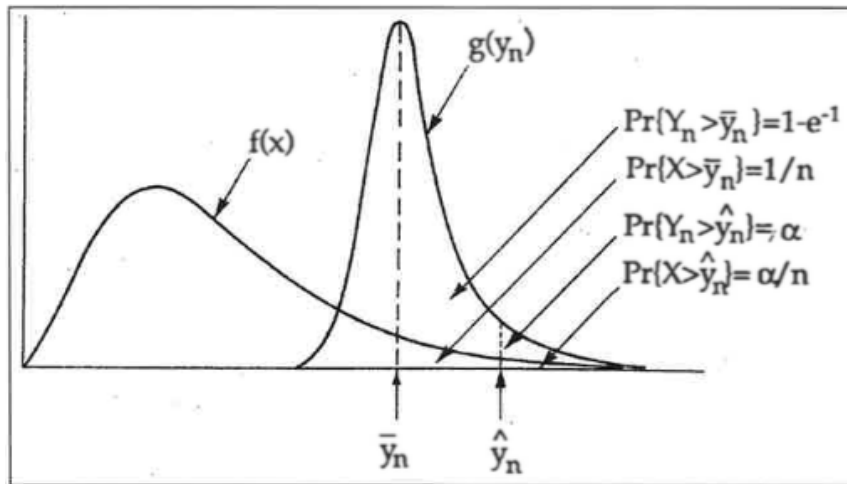
Kuten kaava (4.14) havainnollistaa, todennäköisin ääriarvo ylitetään käyttöiän kuluessa todennäköisyydellä 63,2 %, joten se ei sovellu mitoituskuormaksi. Mitoituksessa täytyy ottaa huomioon matkustajien, rakenteiden ja ympäristön turvallisuus ja tätä varten on suotavaa arvioida ja käyttää kuormaa, jonka ylitystodennäköisyys on pienempi, esimerkiksi 1 % tai 5 %. Käyttämällä pientä arvoa α , jota kutsutaan riskiparametriksi voidaan saada selville ääriarvo \widehat{y}_n , jolle pätee:

$$\int_0^{\widehat{y}_n} g(y_n) dy_n = \{F(\widehat{y}_n)\}^n = 1 - \alpha \quad (4.15)$$

Arvoa \widehat{y}_n kutsutaan suunnitteluääriarvoksi. Olettaen, että n on suuri ja α pieni, voidaan suunnitteluääriarvo ratkaista yhtälöstä

$$1 - F(\widehat{y}_n) = \frac{\alpha}{n} \quad (4.16)$$

Kuva 4.5 havainnollistaa perusjakaumasta muodostettua ääriarvojakaumaa, josta voidaan nähdä todennäköisin ääriarvo \bar{y}_n ja suunnitteluääriarvo \widehat{y}_n . (Ochi 1990)



Kuva 4.5 Perusjakaumasta $f(x)$ laskettu ääriarvojakauma $g(y_n)$. Todennäköisin ääriarvo on \bar{y}_n ja suunnitteluääriarvo on \hat{y}_n . (Ochi 1990)

4.4.1 Eksponenttijakauma

Eksponenttijakauma on yleiseen tarkoitukseen käytettävä todennäköisyysjakauma. Eksponenttifunktio kuvaa Poissonin prosessin tapahtumien välistä aikaa. Eksponenttifunktio on jatkuva ja sen tiheysfunktio on

$$f(x) = \lambda_e e^{-\lambda_e x} \quad (4.17)$$

missä $\frac{1}{\lambda_e}$ on mitattujen arvojen keskiarvo, $E(x)$ (Ochi 1990). Vastaava kertymäfunktio voidaan esittää

$$F(x) = 1 - e^{-\lambda_e x} \quad (4.18)$$

Lisäksi eksponenttijakauman ominaisuus on, että tämän keskiarvo ja keskihajonta ovat yhtä suuria.

Kaavan (4.13) avulla voidaan johtaa eksponenttifunktion todennäköisin ääriarvo

$$\bar{y}_n = \frac{1}{\lambda_e} \ln n \quad (4.19)$$

Suunnitteluääriarvo, joka ottaa huomioon riskiparametrin α :n voidaan johtaa kaavasta (4.16)

$$\hat{y}_n = \frac{1}{\lambda_e} \ln \frac{n}{\alpha} \quad (4.20)$$

(Ochi 1990).

Mikäli käytössä on kynnysarvo eli kyseessä on vajaa perusjoukko, voidaan eksponenttijakauman katkaistut tiheys- ja kertymäfunktiot johtaa kaavojen (4.3) ja (4.4) mukaisesti. Katkaistun kertymäfunktion avulla saadaan johdettua todennäköisin ääriarvo sekä suunnitteluääriarvo, jotka poikkeavat hieman kaavoista (4.19) ja (4.20).

4.4.2 Weibull-jakauma

Weibull-jakauman on kehittänyt Weibull (1951) ja sitä on laajalti käytetty luonnon-tieteellisten käytännön ongelmien tilastolliseen analyysiin. Satunnaismuuttuja x on Weibull jakautunut, jos tämän tiheysfunktio on muotoa

$$f(x) = c_w \lambda_w^{c_w} x^{c_w-1} e^{-(\lambda_w x)^{c_w}} \quad (4.21)$$

missä parametrit c_w ja λ_w voidaan johtaa yhtälöistä

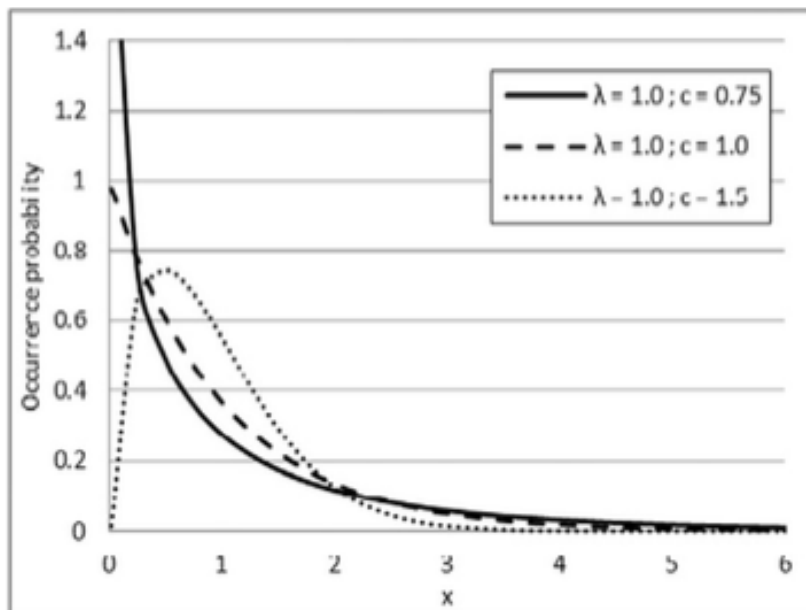
$$E(x) = \frac{1}{\lambda_w} \Gamma\left(1 + \frac{1}{c_w}\right) \quad (4.22)$$

$$Var(x) = \frac{1}{\lambda_w^2} \left\{ \Gamma\left(1 + \frac{2}{c_w}\right) - \left[\Gamma\left(1 + \frac{1}{c_w}\right) \right]^2 \right\} \quad (4.23)$$

Weibull-jakauman kertymäfunktio on

$$F(x) = 1 - e^{-(\lambda_w x)^{c_w}} \quad (4.24)$$

Weibull-jakauma on eksponenttijakauma, kun parametri $c_w = 1$. Kuvassa 4.6 on esitettynä esimerkkejä Weibull-jakaumasta eri c :n arvoilla kun $\lambda_w=1$.



Kuva 4.6 Weibull-todennäköisyysjakaumat vaihteleville c_w :n arvoille kun $\lambda_w=1$. Kun $c_w=1$ kyseessä on eksponenttijakauma. (Suominen ja Kujala 2014)

Weibull-jakauman todennäköisin maksimiarvo on kaavasta (4.13) johdettu

$$\bar{y}_n = \frac{1}{\lambda_w} (\ln n)^{\frac{1}{c_w}} \quad (4.25)$$

ja kaavasta (4.16) johdettu suunnittelüäriarvo on

$$\widehat{y}_n = \frac{1}{\lambda_w} \left(\ln \frac{n}{\alpha} \right)^{\frac{1}{c_w}} \quad (4.26)$$

(Ochi 1990).

Kynnysarvo voidaan ottaa huomioon käytettäessä katkaistua tiheys- ja kertymäfunktioita kaavojen (4.3) ja (4.4) mukaisesti, jolloin myös todennäköisintä ääriarvoa sekä suunnitteluääriarvoa laskettaessa sovelletaan katkaistua kertymäfunktioita.

4.5 Asymptoottiset ääriarvojakaumat

Ääriarvojakaumaa $g(y_n)$, joka suurella havaintolukumäärällä ($n \rightarrow \infty$) lähestyy asymptoottisesti tiettyä muotoa, kutsutaan asymptoottiseksi ääriarvojakaumaksi. Kun ääriarvon Y_n kertymäfunktio kirjoitetaan muotoon

$$G(y_n) = \{F(y_n)\}^n = e^{n \ln F(y_n)} \quad (4.27)$$

voidaan todeta, että $\ln F(y_n) \rightarrow 0$, kun $n \rightarrow \infty$. Siispä arvo, jonka $G(y_n)$ saa riippuu ainoastaan alkuperäisen kertymäfunktion $F(x)$ asymptoottisesta käytöksestä ääriarvoa kohti. Yleisesti jatkuvat satunnaismuuttujat voidaan jakaa kolmeen eri kategoriaan perusjakauman ”hännän” eli suurten amplitudiarvojen jakauman muodon mukaan: (1) jakauma on rajoittamaton ääriarvoa kohti ja jakauman kaikki momentit voidaan määrittää; (2) jakauma on rajoittamaton ääriarvoa kohti, mutta vain osa momenteista voidaan määrittää; ja (3) jakaumalla on äärellinen ylä- ja/tai alaraja, jota suurempia/pienempiä arvoja ei voida määrittää. On todettu, että jokaista eri tyyppistä alkuperäistä jakaumaa varten on olemassa vastaava asymptoottinen ääriarvojakauma. Näitä kutsutaan kehittäjänsä Gumbelin (1958) mukaan Gumbel I-, II- ja III- jakaumiksi.

Toisin kuin perusjakaumaa, asymptoottista ääriarvojakaumaa voidaan käyttää, vaikka kaikkia havaittuja kuormitusamplitudeja ei ole tiedossa. Esimerkiksi, mikäli on tallennettu vain tietyn ajanjakson maksimi-arvot tai halutaan käyttää aikaikkunamenetelmää voidaan käyttää asymptoottista ääriarvojakaumaa. Näin vältetään myös kynnysarvon asettamisesta ja kuormitusfrekvenssin määrittämisestä. Käytettäessä perusjakaumasta johdettua ääriarvojakaumaa on pienimmän huomioitavan kuormitusamplitudin määrittäminen ongelmallista, sillä tämä vaikuttaa huomattavasti jakauman muotoon ja kuormitusfrekvenssiin. Kynnysarvon vaikutus voidaan kuitenkin huomioida käyttämällä vajaaseen perusjoukkoon tarkoitettua katkaistua jakaumaa.

Gumbel I-jakauma on asymptoottisista ääriarvojakaumista yleisin ja suurin osa jakaumista, joilla on eksponenttityyppinen kertymäfunktio yhtyy suurilla havaintolukumäärien arvoilla asymptoottisesti Gumbel I-jakaumaan. Perusjakaumista esimerkiksi eksponentti-, normaali-, lognormaali-, chi-neliö- ja gammajakauman ääriarvot ovat Gumbel I- jakautuneita.

Gumbel I-jakauman tiheys- ja kertymäfunktiot ovat

$$g(y_n) = \beta e^{-\beta(y_n-u)} \cdot e^{-e^{-\beta(y_n-u)}} \quad (4.28)$$

$$G(y_n) = \beta e^{-e^{-\beta(y_n-u)}} \quad (4.29)$$

missä β ja u ovat jakauman parametrit. Parametrien estimointiin on olemassa useita eri menetelmiä, joista voidaan mainita esimerkiksi graafinen menetelmä, momentti-estimaattorimenetelmä ja suurimman uskottavuuden menetelmä. Momentti-estimaattorimenetelmällä voidaan jakaumaparametrit arvioida mitta-aineiston keskihajonnan σ ja keskiarvon μ avulla seuraavilla kaavoilla:

$$\beta = \frac{\pi}{\sigma\sqrt{6}} \quad (4.30)$$

$$u = \mu - \gamma\beta^{-1} \quad (4.31)$$

γ on Euler-Mascheronin vakio, jolla on arvo 0,5772 (Suominen et al. 2015). (Gumbel 1958).

Gumbel I-jakauman todennäköisin maksimi-arvo on

$$\overline{y}_n = u - \beta^{-1} \ln \left(-\ln \left(1 - \frac{1}{n} \right) \right) \quad (4.32)$$

ja suunnitteluääriarvo riskiparametrin α mukaan on

$$\widehat{y}_n = u - \beta^{-1} \ln \left(-\ln \left(1 - \frac{\alpha}{n} \right) \right) \quad (4.33)$$

Gumbel II-jakaumaan soveltuvat jakaumat, joilla on Cauchy-tyyppiset alkuperäisjakaumat. Gumbel II-jakauman tiheysfunktio ja kertymäfunktio ovat

$$g(y_n) = \frac{kv^k}{y_n^{k+1}} e^{\left\{ -\left(\frac{v}{y_n}\right)^k \right\}} \quad (4.34)$$

$$G(y_n) = e^{\left\{ -\left(\frac{v}{y_n}\right)^k \right\}} \quad (4.35)$$

Jakauman parametrit k ja v voidaan estimoida usealla eri tavalla. Tämä voidaan tehdä esimerkiksi mitta-aineiston varianssin $\sigma_{y_n}^2$ ja keskiarvon μ avulla ratkaisemalla arvot yhtälöparista

$$\mu = v\Gamma \left(1 - \frac{1}{k} \right) \quad (4.36)$$

$$\sigma_{y_n}^2 = v^2 \left\{ \Gamma \left(1 - \frac{2}{k} \right) - \Gamma^2 \left(1 - \frac{1}{k} \right) \right\} \quad (4.37)$$

(Ochi 1990).

Gumbel II-jakauman todennäköisin maksimi-arvo on kertymäfunktioista (4.35) johdettuna

$$\overline{y}_n = \frac{v}{k \sqrt{-\ln \left(1 - \frac{1}{n} \right)}} \quad (4.38)$$

ja suunnitteluääriarvo riskiparametrilla α on

$$\widehat{y}_n = \frac{v}{\sqrt[k]{-\ln\left(1-\frac{\alpha}{n}\right)}} \quad (4.39)$$

Käytettäessä kynnysarvoa kuormitusamplitudien tunnistamiseen on kyseessä vajaa perusjoukko. Täten voidaan Gumbel I ja II-jakaumille johtaa katkaistu kertymäfunktio

$$G_t(y_n) = \frac{G(y_n) - G(y_{n_t})}{1 - G(y_{n_t})} \quad (4.40)$$

missä y_{n_t} viittaa kynnysarvoon. Katkaistun kertymäfunktion ja kaavan (4.13) avulla voidaan vajaalle perusjoukolle laskea todennäköisimmät ääriarvot sekä suunnittelu-ääriarvot, jotka ottavat myös kynnysarvon huomioon.

Gumbel III-jakauma yhdistetään alkuperäisjakaumiin, jonka arvoja rajoittavat joko ylä- tai alaraja. Jääkuormien yläraja-arvo määräytyy olemassa olevan jään maksimaalisen lujuuden mukaan, joka on suuruusluokkaa 20 MN/m. Tätä suuruusluokkaa ei rakenteisiin kohdistuvien kuormien oleteta saavuttavan ja täten Gumbel III-jakauma on merkityksetön jääkuormamitta-aineiston analysoinnissa. (Lensu 2002c)

Kun tiedossa on vain tiettyjen ajanjaksojen T_0 maksimiarvot, käytetään todennäköisintä ääriarvoa ja suunnitteluääriarvoa laskettaessa havaintolukumäärän n sijaan aikaikkunoiden lukumäärää T/T_0 .

4.6 Lensun menetelmä

4.6.1 Skaalauskorrelaatiot

Lensu (2002c) on kehittänyt lyhyen ajan jääkuormaennustemenetelmän perustuen Hurstin ja Simaikan (1965) aikoinaan laadittuun Niilin tulvintaennusteteoriaan. Menetelmä perustuu luvussa 4.2.2 esitettyyn aikaikkunamenetelmään ja skaalaus-kertoimeen, joka yhdistää eri pituisien aikaikkunoiden maksimikuormat toisiinsa. Tämä skaalauskerroin määrittelee asymptoottisen ääriarvojakauman, joka voi olla yksi luvussa 4.5 esitellyistä Gumbelin kolmesta jakaumasta. Kutsuttakoon tätä menetelmää Lensun menetelmäksi.

Lensun menetelmässä aikahistoria jaetaan aikaikkunoihin, joiden pituus on T ja joita indeksoidaan i :llä. Kunkin samanpituisen ajanjakson maksimikuorma on y_i ja koko jakson keskimääräinen maksimi y_T on

$$y_T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad (4.41)$$

missä N vastaa aikaikkunoiden lukumäärää. Jos aika T jaetaan vielä aikaikkunoihin λT kutsutaan tätä kertoimen L mukaan skaalaamiseksi

$$T \rightarrow LT \quad (4.42)$$

Kun aikaikkunan pituutta varioidaan saadaan keskimääräiselle maksimille eri arvoja ja luomalla arvoista (T, y_T) -kuvaaja eri mitta-asteikoilla voidaan löytää aikaikkunan

pituuden ja keskimääräisen kuormamaksimin riippuvuus. Jos kuvaus suoritetaan kaksikantaisella logaritmisella asteikolla ja riippuvuuden todetaan olevan lineaarinen, määrittelee suoran kulmakerroin Hurstin eksponentin, joka vaihtelee arvojen 0 ja 1 välillä, jolloin skaalauskorrelaatio toteutuu potenssilain mukaisesti

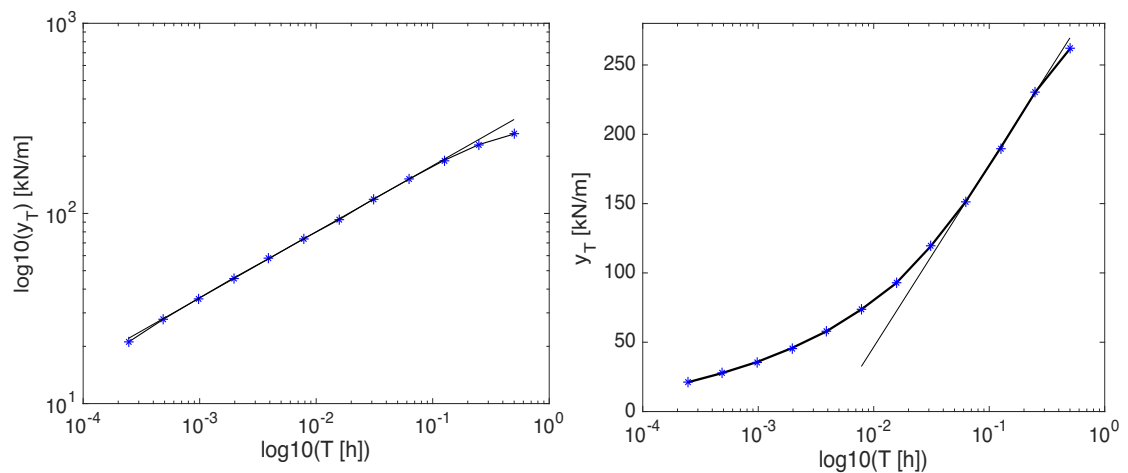
$$y_{\lambda T} = \lambda^H y_T \quad (4.43)$$

Tämä skaalauskorrelaatio voi päteä kaikille aikaikkunoille, mutta ajoittain vain lyhyille aikaikkunoille, jolloin pidemmille aikaikkunoille käytetään skaalauskorrelaation määritelmää

$$y_{\lambda T} = y_T + H' \ln L \quad (4.44)$$

Tämä skaalauskorrelaatio pätee, kun (T, y_T) -kuvaaja luodaan semilogaritmiselle asteikolle (y_T kuvataan $\ln T$:n funktiona) ja tämän todetaan olevan lineaarinen tietyille T :n arvoille. H' on silloin kuvaajan lineaarisen osan kulmakerroin. Lensun (2002c) tutkimuksen mukaan kaavan (4.43) skaalauskorrelaatio toimii hyvin lyhyille aikaikkunoille. Jos aikaikkunan pituus laskee todella pieneksi, voivat jakson keskimääräiseen maksimiin vaikuttaa ne rakenteisiin kohdistuvat kuormat, jotka eivät aiheudu jäädästä. Tällöin aikaikkunan pituuden ja keskimääräisen kuormamaksimin suhde ei välttämättä ole enää lineaarinen. Nostettaessa aikaikkunan pituutta suureksi, mahtuu koko aikahistoriaan ainoastaan rajoitettu määrä kokonaisa aikaikkunoita, jolloin voidaan jo huomata kuormitusmaksimien keskiarvon satunnainen vaihtelu. Kaavan (4.44) skaalauskorrelaatio pätee yleensä pidemmille aikaikkunoille. Mahdollinen syy tähän on, että suuret kuormituspiikit näkyvät usein vasta aikaikkunan keskimääräisen maksimin kasvaessa ja T :n pituuden noustessa. (Lensu 2002c, Lensu 2002a)

Kuvassa 4.7 esitetään Hurstin eksponentin ja H' :n määrittely käyttäen 14:ää eri pituista aikaikkunaa, jotka nousevat ja laskevat binäärisesti yhdestä tunnista.



Kuva 4.7 (T, y_T) -kuvaajat joista määritellään Hurstin eksponentti (vasen kuva) ja H' -arvo (oikea kuva).

4.6.2 Skaalauskorrelaatioiden ääriarvojakaumat

Millä tahansa T :n arvolla voidaan aikaikkunoiden maksimi-arvoille sovittaa jakauma $f(y_i; y_T)$, jonka keskimääräinen maksimi on y_T . Täten skaalauskorrelaatio määrittelee asymptoottisen ääriarvojakauman, joka voi olla joko Gumbel I-, II- tai III-jakauma. Lensu (2002c) totesi, että (T, y_T) -kuvaajan noudattaessa skaalauskorrelaatiota (4.43), on $f(y_i, y_T)$ Gumbel II-ääriarvojakauma ja tämän noudattaessa skaalauskorrelaatiota (4.44), on kyseessä Gumbel I-ääriarvojakauma.

Lyhyille aikaikkunoille soveltuvan Gumbel II-jakauman tiheys- ja kertymäfunktio voidaan ilmaista H :n ja x_T :n mukaan seuraavasti:

$$f_T(y_n) = \frac{1/H}{y_n^{1/H+1}} \left(\frac{y_T}{y_n \Gamma(1-H)} \right)^{1/H} \exp \left\{ - \left(\frac{y_n}{y_n \Gamma(1-H)} \right)^{1/H} \right\} \quad (4.45)$$

$$F_T(y_n) = \exp \left\{ - \left(\frac{y_T}{y_n \Gamma(1-H)} \right)^{1/H} \right\} \quad (4.46)$$

Jakauman varianssi määritellään kaavalla

$$\sigma_{f_T}^2 = y_T^2 \left(\frac{\Gamma(1-2H)}{\Gamma^2(1-H)} - 1 \right) \quad (4.47)$$

Varianssin ollessa negatiivinen oletetaan varianssin olevan kaavan (4.47) itseisarvo.

Pitkille aikaikkunoille soveltuvan Gumbel I-jakauman tiheys- ja kertymäfunktio voidaan johtaa Gumbel II-jakaumasta ja lopulliset funktiot ovat

$$f_T(y_n) = \frac{1}{H'} e^{\left(-\frac{y_n - y_T}{H'} - \gamma \right)} \exp \left(-e^{\left(-\frac{y_n - y_T}{H'} - \gamma \right)} \right) \quad (4.48)$$

$$F_T(y_n) = \exp \left\{ -e^{\left(-\frac{y_n - y_T}{H'} - \gamma \right)} \right\} \quad (4.49)$$

missä γ on Euler-Mascheronin vakio, jolla on arvo 0,5772 (Suominen et al. 2015). Jakauman varianssi on vakio ja määritellään H' mukaan

$$\sigma_{y_n}^2 = H'^2 \frac{\pi^2}{6} \quad (4.50)$$

Kuten aikaisemmin todettiin, Lensun (2002c) tulokset osoittivat, että korkeampien ja matalampien kuormituspiikkien tilastollisuudet eroavat toisistaan. Mahdollinen syy tähän on, että olemassa on kaksi eri kuormitusprosessia, I ja II, joilla on erilaiset ominaisuudet. Prosessi I tuottaa Gumbel I-jakauman tilastollisia arvoja ja prosessi II tuottaa Gumbel II-jakauman tilastollisia arvoja. Molemmat prosessit saattavat tuottaa piikkiamplitudeja millä suuruudella tahansa, mutta keskimääräinen prosessin I piikki on huomattavasti suurempi. Aikaikkunan maksimi voi myös koostua kummankin prosessin piikkiamplitudista, mutta lyhyemmille ikkunoille ne johtuvat suuremmalla todennäköisyydellä prosessista II ja pidemmille ikkunoille prosessista I. Täten voidaan Gumbel I- ja II-funktioista luoda superpositiotiheysfunktio ja -kertymäfunktio seuraavasti:

$$f_T(y_n) = p(T) f_T^I(y_n) + (1 - p(T)) f_T^{II}(y_n), 0 \leq p(T) \leq 1 \quad (4.51)$$

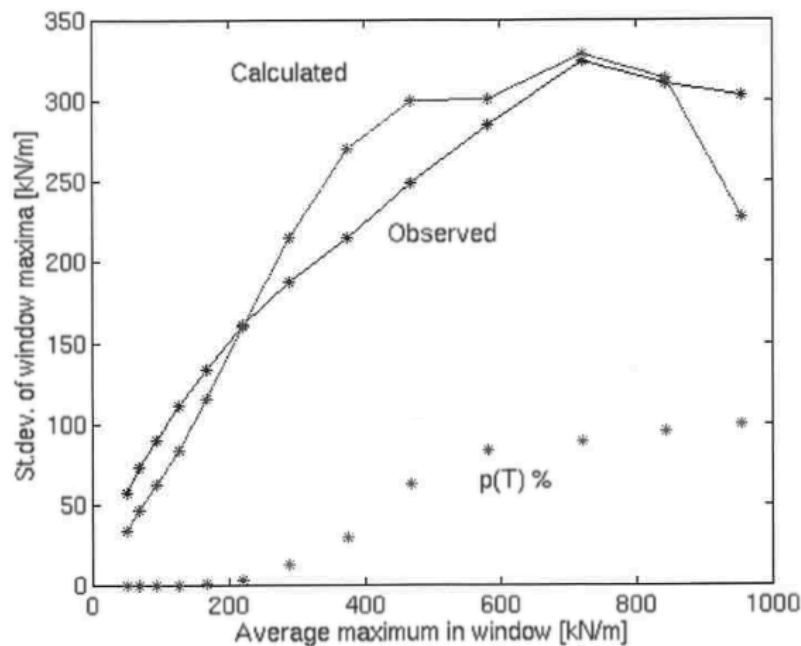
$$F_T(y_n) = p(T)F_T^I(y_n) + (1 - p(T))F_T^{II}(y_n), 0 \leq p(T) \leq 1 \quad (4.52)$$

missä $p(T)$ on superposition painokerroin. Superposition keskiarvo ja varianssi voidaan ilmaista

$$y_T = p(T)y_T^I + (1 - p(T))y_T^{II} \quad (4.53)$$

$$\sigma_{y_n}^2 = p(T)Var(f_T^I) + (1 - p(T))Var(f_T^{II}) + p(T)(1 - p(T))(y_T^I - y_T^{II})^2 \quad (4.54)$$

Jakauman keskihajonta on varianssin neliöjuuri. Gumbel I-jakaumalla on vakio keskihajonta ja Gumbel II-jakauman keskihajonta riippuu lineaarisesti tämän keskimääräisestä maksimiampplitudista y_T^{II} , kuten kaavoista (4.47) ja (4.50) on havaittavissa. Kaavasta (4.51) voidaan johtaa painokertoimen $p(T)$ arvo, jonka avulla saadaan lopullinen superpositiotiheysfunktio. Painokertoimelle tulee päteä $0 \leq p(T) \leq 1$. Jos painokerroin kuitenkin on negatiivinen, oletetaan $p(T) = 0$ ja, kun $p(T) > 1$, oletetaan $p(T) = 1$. Kuvassa 4.8 nähdään esimerkki mitatun ja Lensun menetelmän avulla lasketun keskihajonnan arvoista eri keskimääräisille aikaikkunamaksimeille. Myös painokertoimen vaihtelu on havaittavissa kuvasta. (Lensu 2002c)



Kuva 4.8 Mitatun ja Lensun menetelmän avulla lasketun keskihajonnan vertailu sekä näihin liittyvät painokertoimet. (Lensu 2002c)

Todennäköisimmät maksimiarvot saadaan ratkaisemalla y_n Gumbel I-, II- ja superpositiokertymäfunktioista. Suunnitteluääriarvo saadaan ottamalla huomioon myös riskiparametri α , kuten luvussa 4.4 on esitetty.

4.7 Tilastollisten menetelmien soveltuvuus mitattuun aineistoon

Tilastollisen jakauman soveltuvuutta mitta-aineistoon voidaan tutkia vertaamalla mitattujen kuormien esiintymistodennäköisyyksiä ennustearvoihin. Mitattujen kuormien esiintymistodennäköisyydet voidaan määritellä Weibullin merkitsemisasemien avulla seuraavasti:

$$P_e = \frac{m}{N_T + 1} \quad (4.55)$$

Kaavassa m tarkoittaa kuormitusluokkaan kuuluvien havaintojen määrä ja N_T on mitattujen kuormamaksimien kokonaislukumäärä. Kuormat luokitellaan niin, että kukin mitattu kuorma kuuluu tiettyyn kuormitusluokkaan, jonka koko voi olla esimerkiksi 10 kN/m/luokka.

Mitattujen arvojen toistumisperiodien arvot voidaan määritellä Weibullin merkitsemisasemien avulla kaavalla

$$T_F(x) = \frac{1}{1 - P_e} \quad (4.56)$$

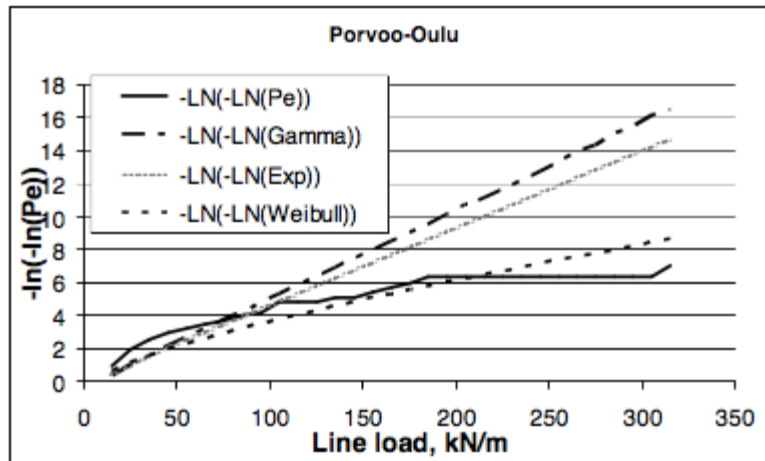
Toistumisperiodin avulla voidaan mitattuja kuormia tarkastella toistoperiodin funktiona ja sovittaa arvoihin parhaiten sopiva tilastollinen jakauma, jonka avulla pyritään esimerkiksi ennustamaan laivan rakenteisiin sen eliniän aikana kohdistuvaa suurinta kuormaa.

Sovitettaessa perusjakauma kuormitusamplitudimenetelmällä poimittujen kuormituspiikkien pohjalta, voidaan tämän perusteella tutkia kuormitusfrekvenssin, ja siihen vaikuttavien tekijöiden, kuten kynnysarvon vaikutusta todennäköisimpään maksimi-arvoon. Kynnysarvon ollessa matala, on kuormitusfrekvenssi yleensä huomattavasti suurempi kuin korkealla kynnysarvolla. Kun kynnysarvo on x_0 , määritellään tutkittavalle ajanjaksolle tiheysfunktio $f(x; x_0)$ ja kertymäfunktio $F(x; x_0)$ sekä lasketaan kuormien keskimääräinen kuormitusfrekvenssi $v_n = n/T$, missä n on kuormituspiikkien lukumäärä ja T on tutkitun ajanjakson pituus eli havaintoperiodi. Kertymäfunktion ja kuormitusfrekvenssin avulla lasketaan toistoperiodi todennäköisimmän kuormamaksimin funktiona

$$T_F(x) = \frac{1}{v_n(1 - F(x; x_0))} \quad (4.57)$$

Täten sitä voidaan verrata mitattujen arvojen toistoperiodeihin.

Perusjakaumien kertymäfunktioita voidaan myös suoraan verrata Weibullin merkitsemisasemien avulla laskettuihin kumulatiivisiin esiintymistodennäköisyyksiin ja näin sovittaa mitattuihin arvoihin parhaiten sopiva perusjakauma. Tämä tehdään yleensä ottamalla esiintymistodennäköisyyden luonnollinen logaritmi kahdesti ($-\ln(-\ln P_e)$), jotta etenkin pienten todennäköisyyksien erotukset näkyisivät selvemmin. Tätä havainnollistaa kuva 4.9, missä aluksen MT Uikku jääkuormamittausten tuloksia on verrattu niiden pohjalta laadittuihin eksponentti-, Weibull- ja gammajakaumiin.



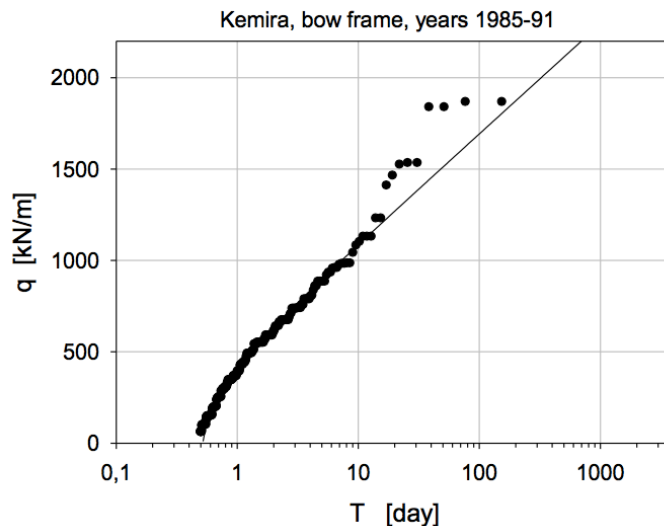
Kuva 4.9 Esimerkki mitattujen kuormamaksimien kumulatiivisesta jakaumasta ja niiden perusteella sovitetut eksponentti-, Weibull- ja gammajakaumat. (Kujala et al. 2009)

Käytettäessä aikaikkunamenetelmää jaetaan perusajanjakso T lyhyempiin jaksoihin T_0 . Aikaikkunamenetelmässä ei ole välttämätöntä määrittää kuormitusfrekvenssiä, vaan perusjakaumat lyhyemmille ja pidemmille aikajaksoille ovat samat, $F_T(x) = F_{T_0}(x)$. Kun perusjakaumaa ei ole tiedossa, vaan tiettyjen ajanjaksojen maksimiarvot käytetään asymptoottista ääriarvojakaumaa. Sovellettaessa parhaiten sopivaa asymptoottista ääriarvojakaumaa kaikille ajanjakson kuormitusamplitudeille on tulos suurin piirtein sama kuin perusjakaumasta johdetulle ääriarvojakaumalle. Asymptoottinen ääriarvojakauma ja perusjakaumasta johdettu ääriarvojakauma yhtyvät paremmin otoskoon kasvaessa.

Kun ääriarvojakauman perustana on tietyn mittaisten ajanjaksojen T_0 maksimi-amplitudit, voidaan todennäköisintä ääriarvoa vastaava toistumisperiodi T_F määrittää seuraavasti:

$$T_F(\bar{y}_n) = \frac{1}{1-G(\bar{y}_n)} T_0 \quad (4.58)$$

Kuvassa 4.10 on esitetty esimerkki aluksen MT Kemira vuosien 1985-1991 keulakaarten 12:en tunnin maksimit sekä maksimien perusteella sovitettu Gumbel I jakauma.



Kuva 4.10 MT Kemiran vuosina 1985-1991 mitatut 12:en tunnin maksimikuormat toistumisperiodin funktiona ja niiden perusteella sovitettu Gumbel I jakauma. (Riska 2011)

4.8 Ennustemallin reagointiominaisuudet

Laivan operointijärjestelmää varten on olennaista, että käytettävä ennustemalli käyttäytyy halutulla tavalla. Jääkuormaennusteeseen tulee vaikuttaa sekä kuormituspiikkien koko että niiden esiintymistiheys. Jos piikkien tiheys säilyy samana, mutta kuormien koko kasvaa, tulisi ennustearvon myös nousta, ja päinvastoin. Jo yhden suuremman kuormituspiikin pitäisi vaikuttaa ennusteeseen. Jos taas kuormitusamplitudi pysyy keskimäärin samana, mutta tiheys kasvaa, tulisi ennusteen reagoida myös tähän nousevasti, sillä suuren kuorman todennäköisyys kasvaa kuormitusfrekvenssin kasvaessa. On kuitenkin vaikeaa arvioida, miten nopeasti ja voimakkaasti ennustearvon tulisi reagoida kyseisiin erilaisiin tapauksiin. On myös tärkeää, että pidemmän ajan ennustemaksimi-arvo on suurempi kuin ennuste lyhyelle ajalle, sillä suurten kuormien esiintymistodennäköisyys on suurempi pitkällä aikahistorialla. Ennustemallien reagointiominaisuuksia voidaan testata analysoimalla erilaisia jää-kuorma-aikahistorioita ja tarkastelemalla, miten ennuste muuttuu jääkuormahistorian mukana, ja miten tämä reagoi muutoksiin.

4.9 Havainto- ja ennusteperiodi

Kun mittaukset etenevät ajassa, rakenteisiin kohdistuu enemmän jääkuormia ja tämä johtaa kuormitusjakauman jatkuvaan muutokseen. Tilastollisten jakaumien perusidea on, että jakauman muoto vakiintuisi havaintolukumäärän kasvaessa suureksi. Tämä ei kuitenkaan toteudu jääkuormamittausten rajallisen havaintolukumäärän takia. Havaintoperiodi on aikaan nähden rajallinen eli analysoidaan jatkuvasti vain havaintoperiodin sisällä olevaa mitta-aineistoa ja vanhempi tieto jätetään huomioimatta. Havaintoperiodin pituus tulisi valita niin, että tulevaisuuden jääkuormaennuste on mahdollisimman luotettava. Havaintoperiodin pituuden tulee olla tarpeeksi pitkä, jotta saadaan kohtuullisen vakaa jääkuormajakauma. Jääolosuhteiden ja jääkuormaennusteen suhde on kuitenkin tuntematon ja tulevan ennusteen tekeminen tulee liittää vallitseviin

jääolosuhteisiin, mikä rajoittaa havaintoperiodin pituutta. Jääkuormien suuruusluokka vaihtelee kuitenkin huomattavasti jopa lyhyellä aikavälillä, joten jääolot eivät periaatteessa koskaan ole vakiot. Mikäli jään paksuus ja muoto eivät näkyvästi muutu, niin voidaan tämä oletus lyhyemmälle aikaperiodille kuitenkin tehdä. Optimaalinen havaintoperiodi saadaan arvioimalla lyhin mahdollinen pituus, jolla ennuste on tarpeeksi luotettava. Tässä työssä verrataan eri menetelmillä ennustettuja todennäköisimpiä jään maksimiamplitudeja mitattuihin havaintoperiodin maksimiarvoihin sekä ennustejanjakson toteutettuihin maksimiarvoihin. Vertailu suoritetaan eri mittaisille havaintoperiodeille tilastollisilla testeillä ja visuaalisella tarkastelulla.

Ennusteperiodi kertoo, miten pitkälle tulevaisuuteen kuormitusennuste suoritetaan. Ennusteperiodi ei ole teoreettisesti erityisen tärkeä, sillä ennuste voidaan suorittaa samalla tilastollisella mallilla usealle ennusteperiodille riippuen siitä, kuinka kauan laivan oletetaan liikkuvan vakionopeudella ja -jääkentässä. Ennusteperiodin käytännöllisyys laivan navigoinnissa on ennemminkin riippuvainen alusta operoivan kapteenin jääolosuhteiden ja reittivalinnan ymmärryksestä. Ennustearvo nousee ennusteperiodin pituuden kasvaessa. Verrattaessa tilastollisin menetelmin ennustettuja todennäköisimpiä jääkuormien maksimiamplitudeja ennusteperiodin mitattuihin arvoihin voidaan kuitenkin määrittellä, miten pitkälle ajassa eteenpäin voidaan laskea luotettava kuormaennuste. (Hänninen ja Lensu 2002)

4.10 Tilastolliset testit

Tilastollisten testien avulla voidaan tarkastella perusjoukolle asetettujen väittämien ja oletusten paikkansapitävyyttä. Testien lähtökohtana on muodostaa perusjoukolle nollahypoteesi (H_0) ja vastahypoteesi (H_1) ja testien tulosten avulla voidaan arvioida, mikäli nollahypoteesi on hylättävä. Tilastollisilla malleilla ennustettuja kuormien todennäköisimpiä maksimiamplitudeja voidaan eri tilastollisilla testeillä verrata mitattuihin maksimikuormiin. Tilastolliset testit perustuvat aina testisuureeseen, joka mittaa havaintojen ja nollahypoteesin yhteensopivuutta. Jos havaintojen ja nollahypoteesin yhteensopivuus on testisuurella mitattuna hyvä, nollahypoteesi jätetään voimaan. Jos yhteensopivuus on huono, nollahypoteesi hylätään ja vaihtoehtoinen hypoteesi otetaan voimaan. Testin merkitsevyystaso on todennäköisyys, että testisuureen havainnoista määrätty arvo joutuu hylkäysalueelle, mikäli nollahypoteesi pätee. Tilastollisista testeistä käsitteellään kahden otoksen Studentin t-testiä, Wilcoxonin kahden otoksen järjestyslukutestiä sekä Kolmogorov-Smirnov –testiä.

Kahden riippumattoman otoksen Studentin t-testissä nollahypoteesina (H_0) on, että kummankin otoksen tarkasteltavan muuttujan keskiarvot ovat yhtä suuria. Vastahypoteesi (H_1) on tällöin kaksisuuntaisessa testissä, että keskiarvot poikkeavat toisistaan. Oletuksena t-testissä on, että havainnot tulevat normaalijakaumasta $N(\mu, s^2)$. Merkittäköön testattavia otoksia 1:llä ja 2:llä, jolloin testisuure voidaan laskea kaavalla

$$t = \frac{\mu_1 - \mu_2}{\sqrt{s_1^2/n_1 + s_2^2/n_2}} \quad (4.59)$$

missä μ_1 ja μ_2 ovat satunnaismuuttujien 1 ja 2 otoskeskiarvot, s_1 ja s_2 ovat otoksien otoskeskihajonnat ja n_1 ja n_2 ovat otoksien otoskoot. Nollahypoteesi pätee, jos testisuure noudattaa approksimatiivisesti Studentin t-jakaumaa vapausastein $n_1 + n_2 - 2$. (Student 1908)

Wilcoxonin kahden otoksen järjestyslukutesti eli Mann-Whitneyn U-testi, joka testaa jakaumien mediaanien yhtäsuuruutta, on epäparametrinen vaihtoehto kahden riippumattoman otoksen Studentin t-testille. Testin nollahypoteesina (H_0) on, että jakaumien mediaanit ovat yhtä suuria. Vastahypoteesi (H_1) on, että jakaumien mediaanit poikkeavat toisistaan. Oletuksena testissä on, että molempien otosten havaintojen järjestyslukujen summat ovat suunnilleen yhtä suuria H_0 :n ollessa voimassa. Ennen testin suorittamista, on kaikki aineiston havainnot asetettava suuruusjärjestykseen ja jokaiselle havainnolle merkittävä järjestysluku, jota käytetään testisuureen laskemisessa. Testisuure U lasketaan kaavalla

$$U = n_1 n_2 + \frac{n_1(n_1+1)}{2} - R_1 \quad (4.60)$$

missä n_1 on otoksen 1 havaintojen lukumäärä, n_2 on otoksen 2 havaintojen lukumäärä ja R_1 on otoksen 1 järjestyslukujen summa. Päätös H_0 :n hylkäämisestä tehdään standardoidun testisuureen z vertailulla standardoituun normaalijakaumaan. Standardoitu testisuure z lasketaan kaavalla

$$z = \frac{U - \mu_U}{s_U} \quad (4.61)$$

missä μ_U on testisuureen odotusarvo ja s_U on testisuureen keskihajonta. Testisuureen z ylittäessä kriittiset raja-arvot, voidaan todeta, että otos ei ole peräisin perusjoukosta, jossa H_0 pitää paikkansa eli H_0 hylätään. (Wilcoxon 1945, Mann ja Whitney 1947)

Kolmogorov-Smirnov -testi on epäparametrinen testi, jonka avulla voidaan tarkastella tulevatko kaksi eri otosta samasta jakaumasta. Nollahypoteesina (H_0) on, että otokset tulevat samasta tilastollisesta jakaumasta, mutta jakaumasta ei kuitenkaan tehdä mitään oletuksia. Vastahypoteesina (H_1) on, että otokset tulevat eri jakaumista. Kolmogorov-Smirnovin testisuure on kahden otoksen kumulatiivisen frekvenssin erotus D , joka lasketaan kaavalla

$$D = |E_1(i) - E_2(i)| \quad (4.62)$$

missä E_1 ja E_2 ovat otosten 1 ja 2 empiiriset kertymäfunktiot. Testisuure lasketaan kaikille otosten arvoille. Nollahypoteesi hylätään, jos yksikään testisuureen arvo ylittää kriittisen arvon, joka on löydettävissä Kolmogorov-Smirnov -taulukosta. (Smirnov 1948)

4.11 Virhearvio

Testattaessa jääkuorman ennustemalleja tavoitteena on löytää malli, joka pystyy mahdollisimman luotettavasti ennustamaan jonkin tietyn ajanjakson tulevaa jääkuorman maksimiampplitudia. Ennusteen luotettavuutta voidaan mitata virhearvion avulla, laskemalla erotukset ennustettujen ja mitattujen arvojen välillä. Virhearvioista käsitellään absoluuttinen keskivirhe, keskineliövirhe ja keskineliövirheen neliöjuuri.

Absoluuttinen keskivirhe (*englanniksi mean absolute error*) mittaa, kuinka lähellä toisiaan mitattu ja ennustettu arvo sijaitsevat. Absoluuttinen keskivirhe *MAE* lasketaan kaavalla

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \bar{y}_i| \quad (4.63)$$

jossa n vastaa havaintojen lukumäärää, y_i vastaa mitattua arvoa eli tässä tapauksessa mitattua maksimiampplitudia ja \bar{y}_i vastaa ennustettua arvoa eli tässä tapauksessa ennustemallin avulla ennustettua todennäköisintä maksimikuormaa.

Ennustemallin keskineliövirhe MSE on absoluuttisten virheiden neliöiden keskiarvo ja lasketaan kaavalla

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2 \quad (4.64)$$

Keskineliövirheen neliöjuuri $RMSE$ lasketaan kaavalla

$$RMSE = \sqrt{MSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (4.65)$$

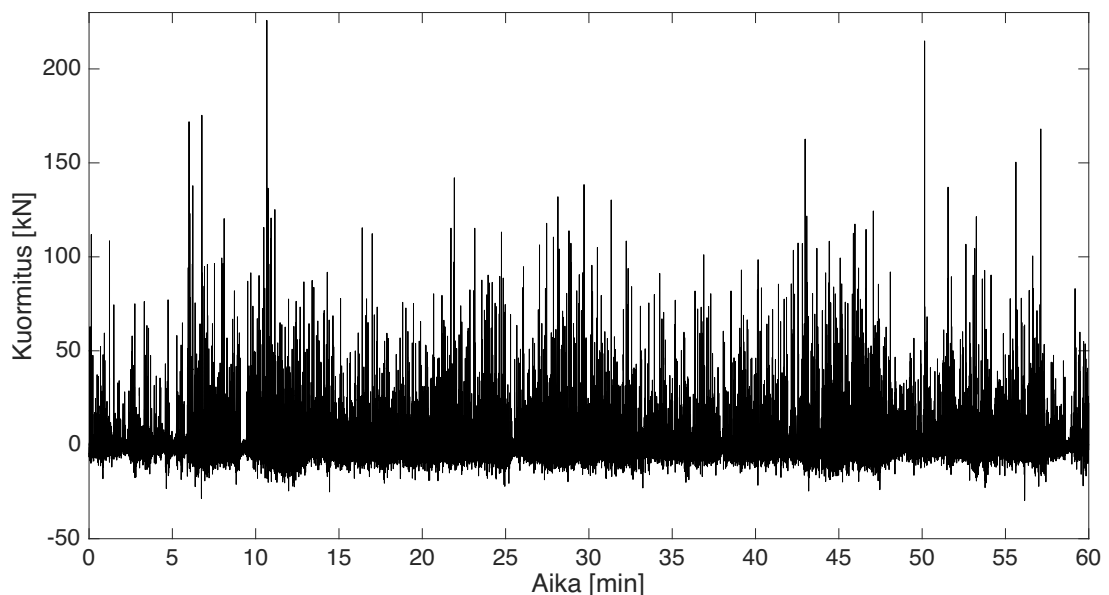
Sekä absoluuttista keskivirhettä että keskineliövirheen neliöjuurta on laajalti käytetty ennustemallien luotettavuuden testaamiseen eri aloilla.

5 Tulokset

5.1 Tilastollisten jakaumien soveltuvuus mitta-aineistoon

Kuvaus tässä diplomityössä käytettävästä mitta-aineistosta sekä sen esikäsittelystä on esitetty kolmannessa luvussa ja työssä sovellettavat menetelmät esiteltiin puolesta neljännessä luvussa. Tässä luvussa analysoidaan mitattuja kuormia ja tutkitaan eri tavoin, miten luvussa neljä käsiteltyä tilastolliset jakaumat ja niiden avulla estimoidut todennäköisimmät maksimi-arvot soveltuvat mitta-aineistoon. Tulokset on tuotettu MATLAB ohjelman versiolla R2015b.

Tilastollisten jakaumien soveltuvuutta mitta-aineistoon tutkittiin ensin sovittamalla satunnaisesti valitun havaintoperiodin aikana mitattuja kuormia eri tilastollisiin jakaumiin. Havaintoperiodina käytettiin pituutta 60 minuuttia ja mitta-aineistona käytettiin 22. maaliskuuta 2012 kello 14.25-15.25 kerättyä dataa. Mittausajankohdan jään paksuus vaihteli 10-30cm ja jään peittoisuus oli visuaalisten havaintojen taulukon mukaan 10/10. Jääkuorma-aikahistoria on esitettyä kuvassa 5.1.

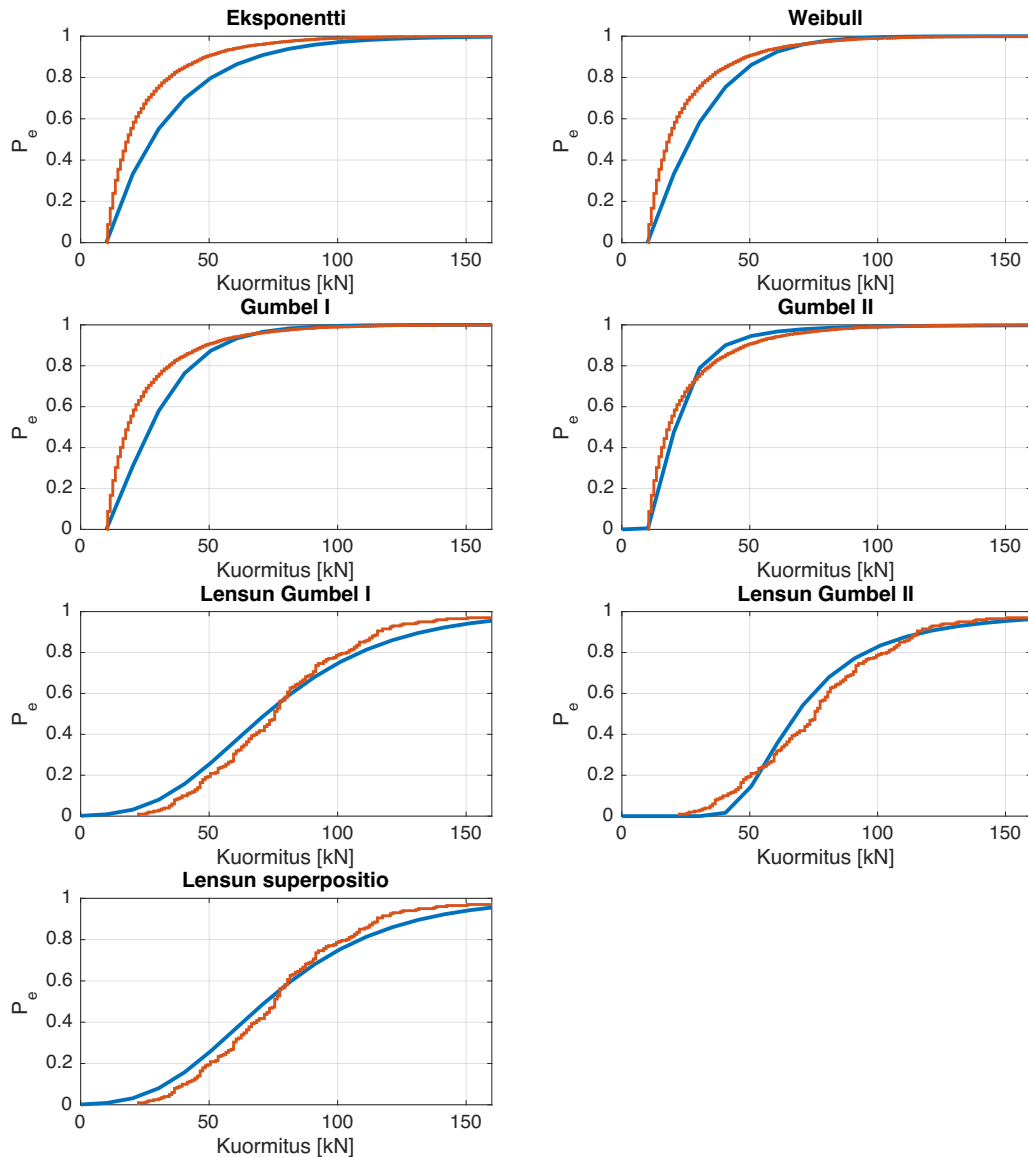


Kuva 5.1 Satunnaisesti valitun tunnin ajanjakson jääkuorma-aikahistoria, kerätty 22.3.2012 klo 14.25-15.25.

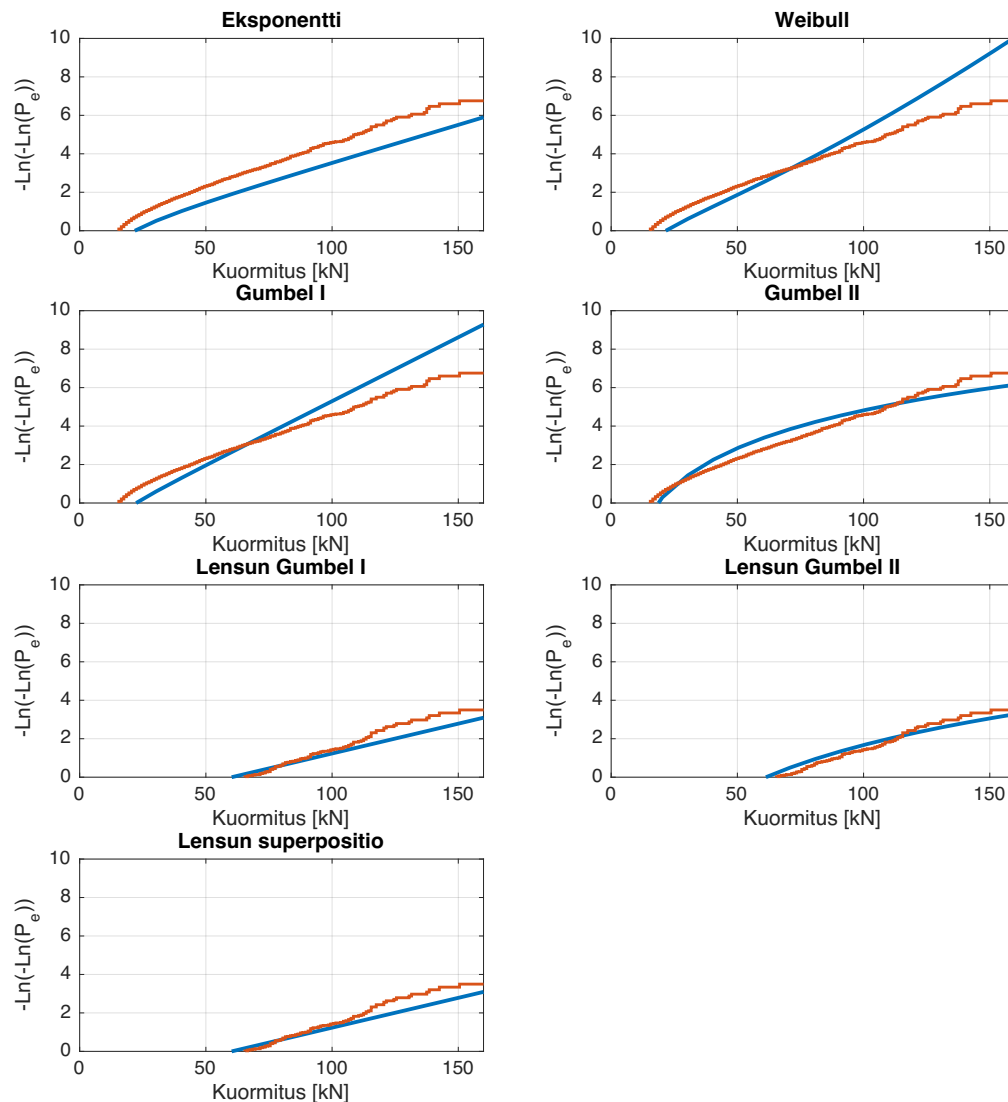
Kuvassa 5.2 on esitettyä mitattujen kuormien ylitystodennäköisyydet sekä eri menetelmillä estimoidut kertymäfunktio. Ottamalla luonnollinen logaritmi kahdesti, sekä mitatuista että jakaumien avulla estimoiduista ylitystodennäköisyyksistä näkyvät etenkin pienten todennäköisyyksien erotukset selvemmin, kuten kuva 5.3 havainnollistaa. Sekä kuvien 5.2 ja 5.3 mitattujen arvojen kertymäfunktioissa on käytetty yhden kN:n luokkaväliä.

Kuvista 5.2 ja 5.3 voidaan havaita, että Gumbel II- sekä Lensun menetelmien kertymäfunktio sopivat graafisen tarkastelun perusteella hyvin mitattuihin arvoihin. Eksponentti-, Weibull- ja Gumbel I-jakaumilla laaditut kertymäfunktio poikkeavat

mitatuista arvoista enemmän. Kuten kuvista 5.2 sekä 5.3 voidaan havaita, Lensun menetelmien rinnalla esitetyt mitatut ylitystodennäköisyydet eroavat eksponentti-, Weibull-, Gumbel I- ja Gumbel II- jakaumien rinnalla esitetyistä mitatuista ylitystodennäköisyyksistä, johtuen eriävistä kuormitusamplituditunnistusmenetelmistä. Eksponentti-, Weibull-, Gumbel I- ja Gumbel II- jakaumissa on sovellettu kuormitusamplitudimenetelmää, ja vastaavasti Lensun menetelmissä on käytetty aikaikkunamenetelmää. Aikaikkunamenetelmällä tunnistettiin vähemmän kuormitusamplitudeja kuin kuormitusamplitudimenetelmällä, jolloin mitattu kertymäfunktio nousee hieman loivemmin.



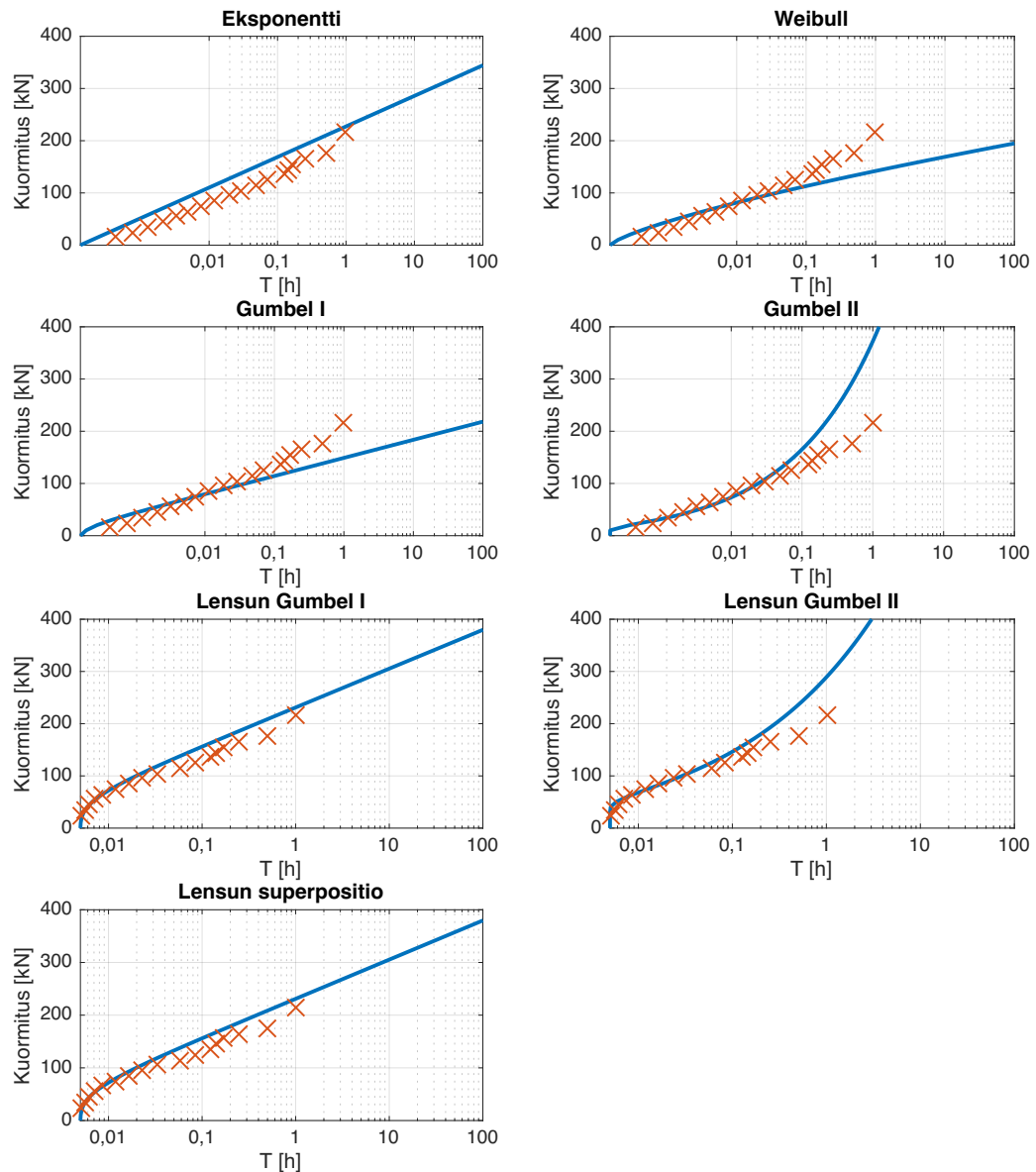
Kuva 5.2 Eksponentti-, Weibull-, Gumbel I-, Gumbel II-, Lensun Gumbel I-, Lensun Gumbel II- sekä Lensun superposition kertymäfunktioiden sovitus tunnin havainto-periodin mitattuihin ylitystodennäköisyyksiin. Punaiset käyrät vastaavat mitattua ylitystodennäköisyysfunktiota ja siniset käyrät vastaavat tilastollisten menetelmien avulla laadittuja kertymäfunktioita.



Kuva 5.3 Eri tilastollisten menetelmien kaksinkertaisen luonnollisen logaritmin kertymäfunktioiden ja mitattujen arvojen vertailu. Mitatut arvot ovat kuvattuna punaisella ja jakaumien avulla lasketut arvot sinisellä.

Mitatut ja tilastollisten menetelmien avulla lasketut toistumisperiodit ovat esitettyinä kuvassa 5.4. Kuvassa on käytetty mitatulle aineistolle luokkaväliä 10 kN. Mitatut toistumisperiodit laskettiin kaavojen (4.55) ja (4.56) avulla ja jakaumien avulla estimoidut toistumisperiodit laskettiin kaavojen (4.57) ja (4.58) mukaan. Kuvasta 5.4 on havaittavissa, että eksponentti-, Lensun Gumbel I- ja superpositiojakaumilla lasketut arvot soveltuvat graafisen tarkastelun perusteella mitta-aineistoon erittäin hyvin. Gumbel I- ja Weibull -jakauman avulla lasketut käyrät aliarvioivat suuria kuormia merkittävästi. Gumbel II- sekä Lensun Gumbel II-toistumisperiodikuvaajissa voidaan havaita jyrkkä kuormituksen nousu toistumisperiodin kasvaessa, joka johtaa kuormien yliarviointiin maksimiarvoa estimoitaessa pitkälle eteenpäin. On kuitenkin otettava huomioon, että kuvissa 5.2-5.4 kyseessä on vain yhden havaintoperiodin sovitus, joka ei

realistisesti kuvaa kokonaistilannetta, vaan toimii esimerkkinä jakaumien sovituksista mitta-aineistoon.



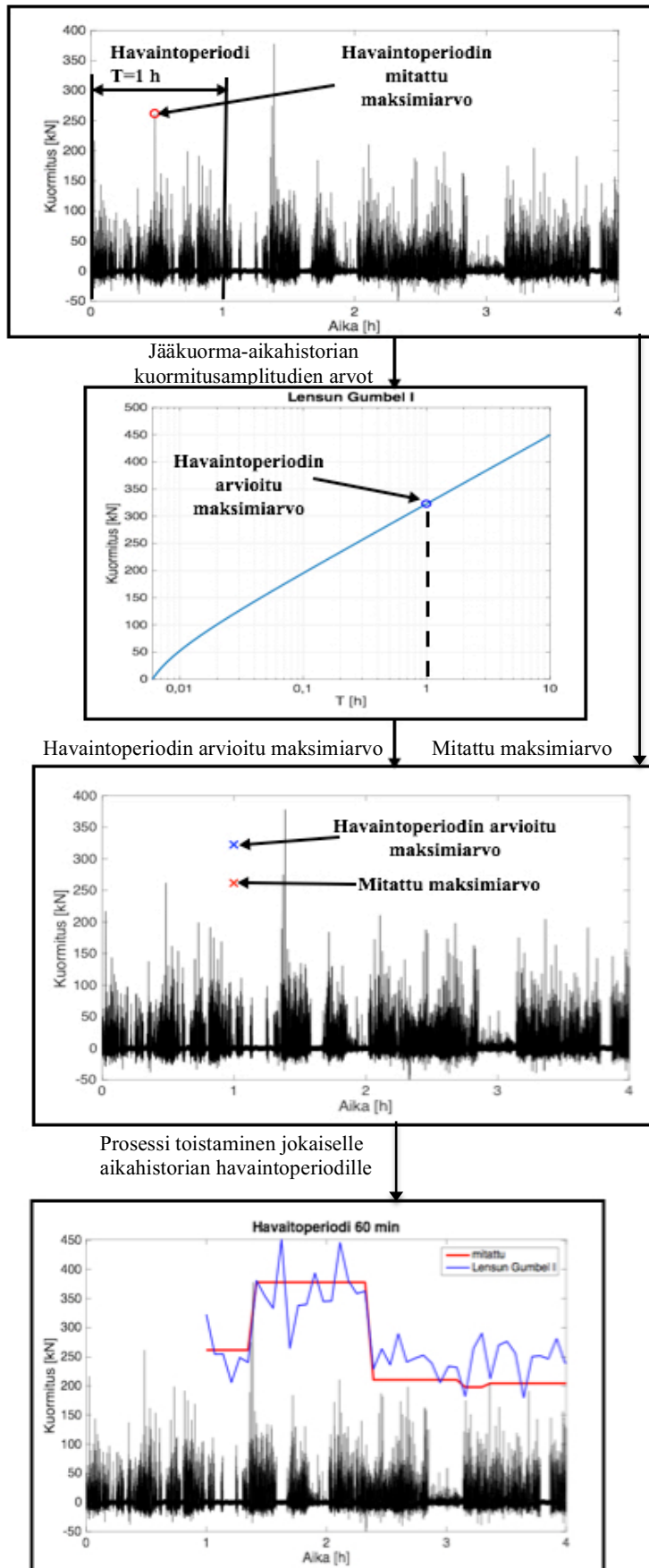
Kuva 5.4 Tunnin havaintoperiodin aikana mitatut sekä eksponentti-, Weibull-, Gumbel I-, Gumbel II-, Lensun Gumbel I-, Lensun Gumbel II- sekä Lensun superpositio-todennäköisyysjakaumien avulla lasketut toistumisperiodit.

5.2 Vertailu havaintoperiodin mitattujen maksijääkuormien kanssa

Lopullisesta 11,33 tuntia pitkästä jääkuormamitta-aineistosta lasketettiin eksponentti-, Weibull-, Gumbel I- ja II-jakaumien sekä Lensun Gumbel I-, Gumbel II- ja superpositiomenetelmien avulla jääkuorman todennäköisimmät maksimiamplitudit 50 000

mittapisteen eli 4,17 minuutin välein. Todennäköisimmät maksimiamplitudit laskettiin vain havaintoperiodin sisällä olevalle mitta-aineistolle, jolloin vanhempi tieto jätettiin huomioimatta. Todennäköisimmän maksimiarvon laskeminen suoritettiin havaintoperiodeille 15, 30, 45, 60 ja 90 minuuttia sekä kaksi ja neljä tuntia ja havaintoperiodeja oli yhteensä 48-160 kappaletta riippuen havaintoperiodin pituudesta. Todennäköisin maksimiarvo laskettiin havaintoperiodin kanssa samanpituiselle ajanjaksolle. Jakauman avulla määriteltävää maksimia kutsutaan tässä työssä havaintoperiodin arvoiduksi maksimiarvoksi. Lensun menetelmissä havaintoperiodin arvioidun maksimin laskemiseen käytettiin aikaikkunan pituutta 18 sekuntia. Tähän päädyttiin testaamalla eri vaihtoehtoja, joiden perusteella tämän aikaikkunan pituuden todettiin toimivan hyvin.

Havaintoperiodien arvioituja maksimiarvoja verrattiin saman ajanjakson todellisiin mitattuihin maksimiamplitudeihin ja tutkittiin, millä menetelmällä arvioitu maksimiarvo on lähimpänä mitattua arvoa. Esimerkki havaintoperiodin arvioidun maksimin ja mitatun arvon määrittelemisestä on esitetty kuvassa 5.5. Havaintoperiodin T mitta-aineiston perusteella lasketaan todennäköisin maksimiarvo toistumisperiodikuvaajan avulla, jota verrataan sitten havaintoperiodin mitta-aineiston todelliseen maksimiamplitudiin. Kun tämä prosessi suoritetaan tietyllä aikavälillä saadaan lopulta mitattujen arvojen ja havaintoperiodien arvioitujen maksimiarvojen aikajana.



Kuva 5.5 Esimerkki mitatun maksimiarvon määrittämisestä yhden tunnin havaintoperiodilla sekä Lensun Gumbel I menetelmän havaintoperiodin arvioitun maksimin estimointi.

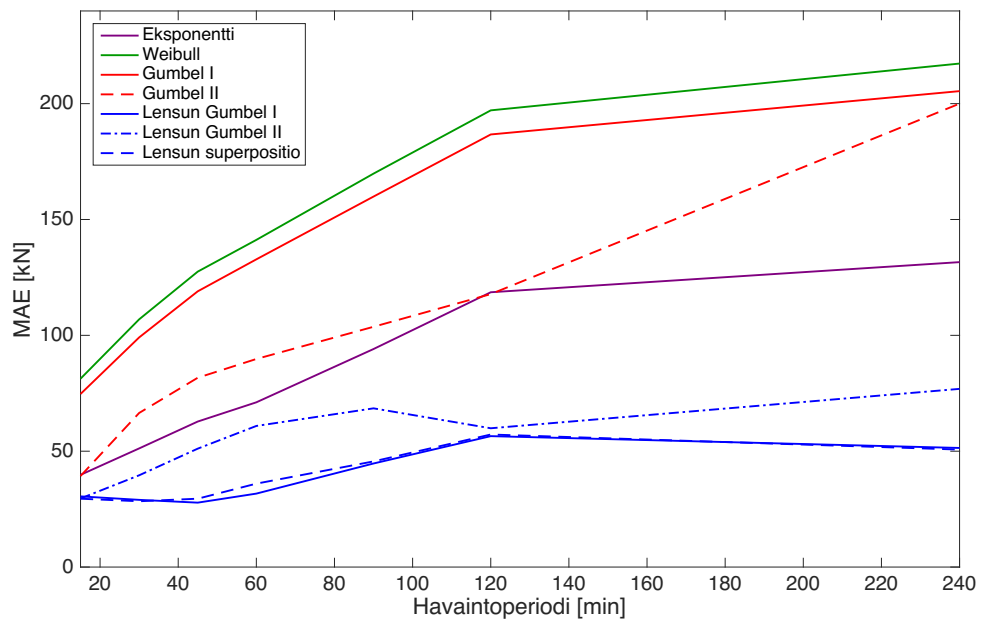
Lähimmän havaintoperiodin arvioidun maksimin jakautuminen tutkituille havaintoperiodeille on havaittavissa taulukosta 5.1. Prosenttiluku kuvaa sitä osuutta ajasta, jolloin kyseisen menetelmän havaintoperiodin arvioitu maksimi sopii menetelmien havaintoperiodien arvioiduista maksimeista parhaiten yhteen havaintojen kanssa. Lisäksi taulukossa 5.1 on esitetty havaintoperiodien arvioitujen maksimien absoluuttiset keskivirheet sekä keskineliövirheen neliöjuuret, jotka on laskettu luvun 4.11 mukaan. Taulukoissa absoluuttisen keskivirheen merkintä on MAE ja keskineliövirheen neliöjuuri on RMSE. Havaintoperiodien arvioitujen maksimien absoluuttiset keskivirheet sekä keskineliövirheen neliöjuuret on myös esitetty graafisesti kuvissa 5.6 sekä 5.7.

Taulukon 5.1 sekä kuvien 5.6-5.7 mukaan Weibull- ja Gumbel I-jakaumien avulla arvioidut havaintoperiodien maksimit poikkeavat selkeästi eniten mitatuista arvoista. Havaintoperiodien arvioitujen maksimien virheet ovat suuret ja parhaan yhteensopivuuden osuus on nolla melkein kaikilla havaintoperiodin pituuksilla. Lensun menetelmät näyttävät toimivan parhaiten verrattuna muihin menetelmiin ja niiden saamat virhearvot mitattujen ja arvioitujen maksimien välillä ovat kohtalaisen pieniä. Kaikki Lensun menetelmät saavuttavat ajoittain myös havaintoperiodin mitattua maksimiarvoa lähimmän arvioidun maksimin. Varsinkin pidemmällä havaintoperiodin pituudella Lensun menetelmät näyttävät tulosten mukaan toimivan huomattavasti paremmin kuin muut menetelmät. Eksponenttijakauman avulla arvioidut maksimiarvot sopivat parhaiten mitattuihin arvoihin kolmella havaintoperiodin pituudella, mutta absoluuttiset keskivirheet sekä keskineliövirheen neliöjuuret ovat kaikilla havaintoperiodeilla melko suuret, todennäköisesti johtuen osan arvioiduista maksimeista soveltuvan mittadataan todella hyvin ja osan arvioiduista maksimeista soveltuvan mittadataan huomattavasti heikommin. Vaikka eksponenttijakauman todettiin kuvan 5.4 perusteella soveltuvan mitta-aineistoon hyvin, voidaan esitettyjen tulosten perusteella todeta, että jakauman avulla lasketut arvot eivät yleisesti sovi yhteen mitattujen arvojen kanssa kovinkaan hyvin.

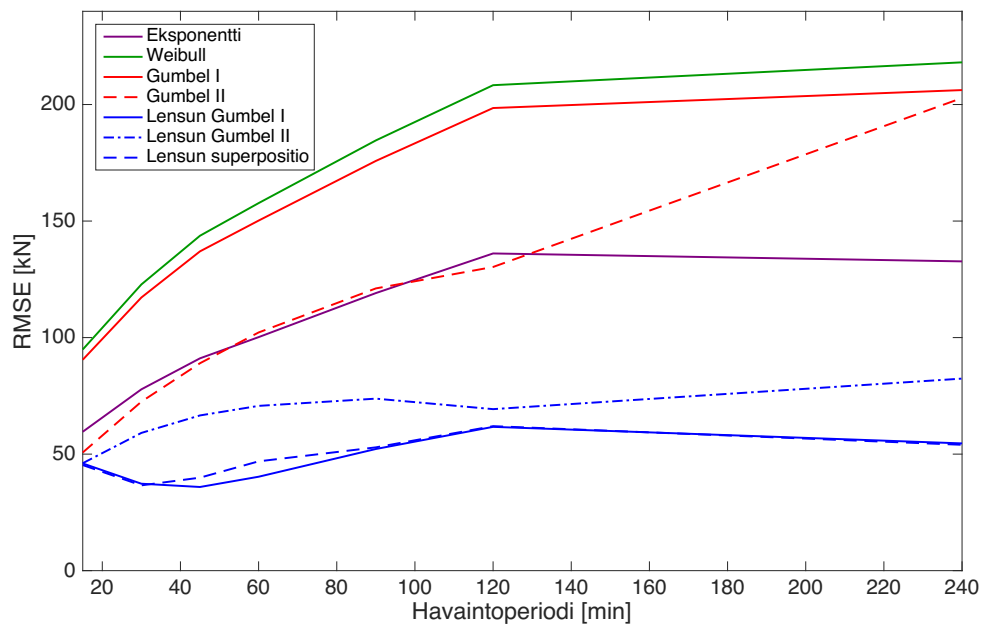
Kuvien 5.6 ja 5.7 mukaan, havaintoperiodin pidentyessä absoluuttiset keskivirheet ja keskineliövirheiden neliöjuuret kasvavat melkein kaikilla menetelmillä. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että lyhyellä aikavälillä hajonta on yleisesti pienempi kuin pitkällä aikavälillä. Tässä suhteessa Lensun menetelmät ovat poikkeus, sillä Lensun menetelmillä arvioitujen maksimiarvojen virhearvot eivät merkittävästi nouse eri havaintoperiodin arvoilla. Myös eksponenttijakauman avulla arvioidun maksimiarvon keskineliövirheen neliöjuuri laskee kahden ja neljän tunnin havaintoperiodien välillä. Pienimmän absoluuttisen keskivirheen sekä keskineliövirheen neliöjuuren saavuttaa Lensun Gumbel I-menetelmällä arvioitu havaintoperiodin maksimi 45 minuutin havaintoperiodilla.

Taulukko 5.1 Parhaan mitatun aineiston yhteensopivuuden prosentuaaliset osuudet tilastollisten menetelmien kesken, havaintoperiodien arvioitujen maksimiarvojen absoluuttiset keskivirheet (=MAE) sekä keskineliövirheiden neliöjuuret (=RMSE).

<i>Havainto- periodi</i>	<i>Menetelmä</i>	<i>Paras yhteensopivuus mitatun arvon kanssa [%]</i>	<i>MAE [kN]</i>	<i>RMSE [kN]</i>
15 min	EkspONENTTI	13,8	39,8	59,6
	Weibull	0	81,3	94,9
	Gumbel I	4,4	74,7	90,5
	Gumbel II	24,4	39,3	50,7
	Lensu Gumbel I	14,4	30,5	46,0
	Lensu Gumbel II	28,1	29,6	46,1
	Lensu superpositio	15	29,5	45,3
30 min	EkspONENTTI	26,9	51,2	77,8
	Weibull	0	106,9	122,8
	Gumbel I	0	99,1	117,2
	Gumbel II	3,2	66,5	72,5
	Lensu Gumbel I	19,2	29,0	37,3
	Lensu Gumbel II	31,4	39,6	59,1
	Lensu superpositio	19,2	28,4	36,6
45 min	EkspONENTTI	27,5	62,8	91,1
	Weibull	0	127,5	143,7
	Gumbel I	0	119,0	137,0
	Gumbel II	9,2	81,7	89,0
	Lensu Gumbel I	19,0	27,8	35,9
	Lensu Gumbel II	21,8	51,1	66,6
	Lensu superpositio	22,5	29,5	39,9
60 min	EkspONENTTI	33,6	71,1	100,2
	Weibull	0	141,2	157,7
	Gumbel I	0	132,8	150,2
	Gumbel II	19,5	89,8	102,2
	Lensu Gumbel I	17,4	31,7	40,3
	Lensu Gumbel II	12,8	60,9	70,7
	Lensu superpositio	16,8	36,0	46,9
90 min	EkspONENTTI	30,3	94,1	119,1
	Weibull	0	169,8	184,6
	Gumbel I	0	159,9	175,8
	Gumbel II	25,2	103,7	121,1
	Lensu Gumbel I	17,6	44,7	52,2
	Lensu Gumbel II	16,0	68,5	73,8
	Lensu superpositio	11,0	45,6	52,9
2 h	EkspONENTTI	21,9	118,6	136,1
	Weibull	0	197,1	208,3
	Gumbel I	0	186,7	198,5
	Gumbel II	0	117,8	130,3
	Lensu Gumbel I	20,0	56,5	61,7
	Lensu Gumbel II	51,4	59,9	69,3
	Lensu superpositio	6,7	57,2	62,0
4 h	EkspONENTTI	0	131,6	132,7
	Weibull	0	217,3	218,1
	Gumbel I	0	205,4	206,2
	Gumbel II	0	200,0	202,8
	Lensu Gumbel I	22,9	51,4	54,6
	Lensu Gumbel II	29,2	76,9	82,4
	Lensu superpositio	47,9	50,7	54,0



Kuva 5.6 Eri havaintoperiodien arvioitujen maksimiarvojen absoluuttiset keskivirheet.



Kuva 5.7 Eri havaintoperiodien arvioitujen maksimiarvojen keskineliövirheiden neliöjuuret.

Mitattuja ja tilastollisten menetelmien avulla arvioituja maksimiamplitudeja tarkasteltiin myös kahtena eri otoksena, jolloin otoksille pystyttiin suorittamaan tilastollisia testejä. Otoksille suoritettiin 5 % merkitsevyystasolla kahden otoksen t-testi, Wilcoxonin kahden otoksen järjestyslukutesti ja Kolmogorov-Smirnov -testi. Hyväksytty tilastollinen testi todistaa otosten yhteensopivuuden valitulla merkitsevyystasolla.

Testien tulokset 15, 30, 45, 60 ja 90 minuutin sekä kahden ja neljän tunnin havaintoperiodeille nähdään taulukosta 5.2. Eksponentti-, Weibull-, Gumbel I- ja Gumbel II-jakaumien havainto-otosten ja mitattujen maksimiampplitudien otosten yhteensopivuuden nollahypoteesi hylätään kaikkien kolmen testin kohdalla kaikilla havaintoperiodeilla. Kahden otoksen t-testin nollahypoteesina oli, että kummankin otoksen maksimikuormitusten keskiarvot ovat yhtä suuria, Wilcoxonin kahden otoksen järjestyslukutestin nollahypoteesina oli, että otosten mediaanit ovat yhtä suuria ja Kolmogorov-Smirnov -testin nollahypoteesina oli, että otokset tulevat samasta tilastollisesta jakaumasta, mutta jakauman tyypistä ei kuitenkaan tehdä mitään oletuksia.

Osalla havaintoperiodeista Lensun menetelmillä suoritettut testit hyväksytään 5 % merkitsevyystasolla. Lensun Gumbel I-menetelmä, jolle testeistä hylätään tilastollisia testejä ainoastaan pitkällä havaintoperiodilla, toimii taulukon 5.2 mukaan kaikkein parhaiten, mutta myös Lensun superpositiomenetelmälle hyväksytään suuri osa testeistä.

Taulukko 5.2 Kahden otoksen t-testin, kahden otoksen Wilcoxonin järjestyslukutestin ja Kolmogorov-Smirnov –testin tulokset eri havaintoperiodeille 5% merkitsevyystasolla.

<i>Havainto- periodi</i>	<i>Menetelmä</i>	<i>T-testi</i>	<i>Wilcoxonin järjestyslukutesti</i>	<i>Kolmogorov- Smirnov -testi</i>
15 min	Eksponentti	Hylätty	Hylätty	Hylätty
	Weibull	Hylätty	Hylätty	Hylätty
	Gumbel I	Hylätty	Hylätty	Hylätty
	Gumbel II	Hylätty	Hylätty	Hylätty
	Lensu Gumbel I	Hyväksytty	Hyväksytty	Hyväksytty
	Lensu Gumbel II	Hyväksytty	Hyväksytty	Hylätty
	Lensu superpositio	Hyväksytty	Hylätty	Hyväksytty
30 min	Eksponentti	Hylätty	Hylätty	Hylätty
	Weibull	Hylätty	Hylätty	Hylätty
	Gumbel I	Hylätty	Hylätty	Hylätty
	Gumbel II	Hylätty	Hylätty	Hylätty
	Lensu Gumbel I	Hyväksytty	Hyväksytty	Hyväksytty
	Lensu Gumbel II	Hyväksytty	Hylätty	Hyväksytty
	Lensu superpositio	Hyväksytty	Hyväksytty	Hyväksytty
45 min	Eksponentti	Hylätty	Hylätty	Hylätty
	Weibull	Hylätty	Hylätty	Hylätty
	Gumbel I	Hylätty	Hylätty	Hylätty
	Gumbel II	Hylätty	Hylätty	Hylätty
	Lensu Gumbel I	Hyväksytty	Hyväksytty	Hyväksytty
	Lensu Gumbel II	Hylätty	Hylätty	Hyväksytty
	Lensu superpositio	Hyväksytty	Hyväksytty	Hyväksytty
60 min	Eksponentti	Hylätty	Hylätty	Hylätty
	Weibull	Hylätty	Hylätty	Hylätty
	Gumbel I	Hylätty	Hylätty	Hylätty
	Gumbel II	Hylätty	Hylätty	Hylätty
	Lensu Gumbel I	Hyväksytty	Hyväksytty	Hyväksytty
	Lensu Gumbel II	Hylätty	Hylätty	Hyväksytty
	Lensu superpositio	Hyväksytty	Hylätty	Hyväksytty
90 min	Eksponentti	Hylätty	Hylätty	Hylätty
	Weibull	Hylätty	Hylätty	Hylätty
	Gumbel I	Hylätty	Hylätty	Hylätty
	Gumbel II	Hylätty	Hylätty	Hylätty
	Lensu Gumbel I	Hyväksytty	Hylätty	Hyväksytty
	Lensu Gumbel II	Hyväksytty	Hylätty	Hyväksytty
	Lensu superpositio	Hyväksytty	Hylätty	Hyväksytty
120 min	Eksponentti	Hylätty	Hylätty	Hylätty
	Weibull	Hylätty	Hylätty	Hylätty
	Gumbel I	Hylätty	Hylätty	Hylätty
	Gumbel II	Hylätty	Hylätty	Hylätty
	Lensu Gumbel I	Hylätty	Hylätty	Hylätty
	Lensu Gumbel II	Hyväksytty	Hylätty	Hylätty
	Lensu superpositio	Hylätty	Hylätty	Hylätty
240 min	Eksponentti	Hylätty	Hylätty	Hylätty
	Weibull	Hylätty	Hylätty	Hylätty
	Gumbel I	Hylätty	Hylätty	Hylätty
	Gumbel II	Hylätty	Hylätty	Hylätty
	Lensu Gumbel I	Hylätty	Hylätty	Hylätty
	Lensu Gumbel II	Hylätty	Hylätty	Hylätty
	Lensu superpositio	Hylätty	Hylätty	Hylätty

Lisäksi havaintoperiodien mitattujen maksimi-arvojen ja arvioitujen maksimi-arvojen yhteensopivuutta sekä menetelmien reagointiominaisuuksia tutkittiin visuaalisesti tarkastelemalla aikajanaa, jossa havaintoperiodien arvioidut maksimi-arvot on kuvattu mitattujen arvojen ohessa. Havaintoperiodien arvioitujen maksimi-arvojen laskentaan sovellettu jääkuorma-aikahistoria on esitetty kuvassa 5.8. Kuvissa 5.9-5.15 on esitetty mitatut maksimi-amplitudit sekä jakaumien avulla laskettujen todennäköisimmät maksimikuormat samoille havaintoperiodeille kuin taulukoissa 5.1-5.2. Kuvissa 5.9-5.14 on 11,33 tuntia pitkstä aikahistoriasta esitetty vain neljän ensimmäisen tunnin havaintoperiodien arvioidut maksimi-arvot, jotta erotukset näkyisivät selvemmin. Neljän tunnin havaintoperiodilla aikahistoria on kuvattu neljästä tunnista 11,33:een tuntiin, sillä havaintoperiodien arvioidut maksimi-arvot alkavat vasta neljän tunnin jälkeen.

Kuten todettiin aikaisemmin, suurin osa havaintoperiodien arvioituista maksimi-arvoista näyttää sopivan paremmin mitattuun aineistoon havaintoperiodin ollessa lyhempi. Kuvien 5.8-5.15 perusteella voidaan todeta, että eksponentti-, Weibull- ja Gumbel I-jakaumien avulla arvioidut maksimi-arvot ovat huonoja estimoimaan kaikkein suurimpia maksimikuormia, etenkin havaintoperiodin kasvaessa. Weibull- ja Gumbel II-jakaumien avulla arvioidut maksimi-arvot alittavat reilusti mitatun maksimikuorman kaikilla havaintoperiodeilla ja sopivat huonosti yhteen mitattujen arvojen kanssa, kuten myös taulukkojen 5.1-5.2 tulokset osoittivat. Eksponenttijakauman havaintoperiodien arvioitujen maksimi-arvojen aikajana on melko tasainen ja sopii hyvin osaan mitatuista arvoista, mutta aliarvioi huomattavasti suuren osan mitatuista maksimikuormista. Kuvasta 5.15 on selkeästi havaittavissa, että havaintoperiodien arvioidut maksimikuormat poikkeavat merkittävästi mitatuista kuormista. Kahden tunnin havaintoperiodiin asti Lensun menetelmät seuraavat mitattuja kuormia melko hyvin, mutta neljän tunnin havaintoperiodilla Lensun Gumbel I- ja superpositiomenetelmien avulla arvioidut maksimi-arvot aliarvioivat mitattuja maksimikuormia, Lensun Gumbel II-menetelmän avulla arvioitujen maksimi-arvojen yliarvioidessa mitattuja maksimikuormia.

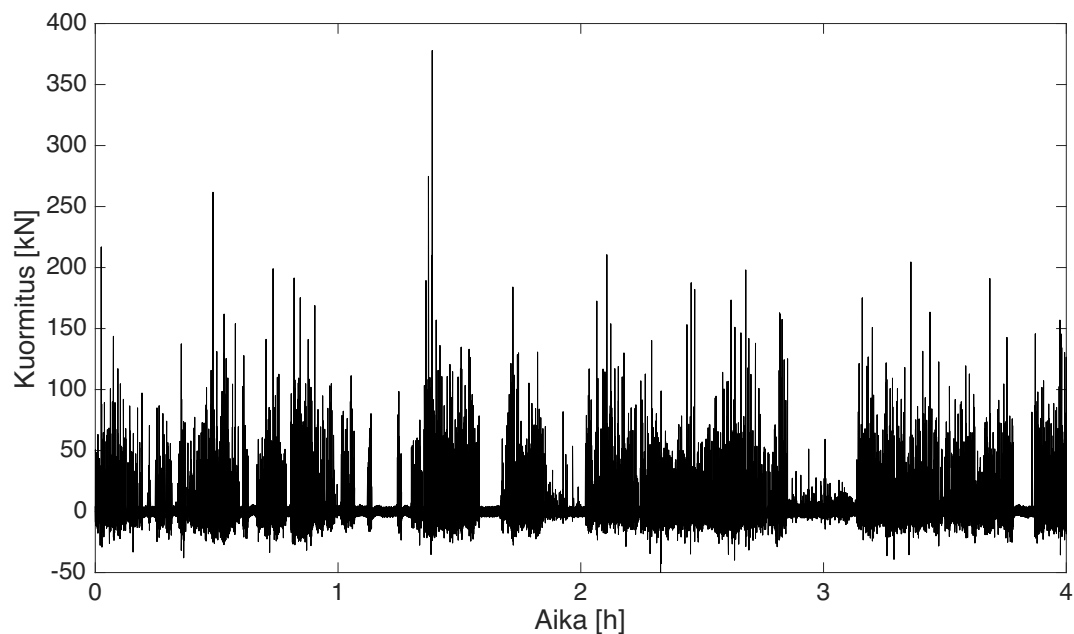
Lensun superpositiomenetelmä on yhdistelmä Lensun Gumbel I- ja II-menetelmistä ja menetelmän avulla laskettu arvo riippuu superposition painokertoimesta $p(T)$. Kuvien 5.9-5.15 perusteella Lensun superpositiomenetelmän havaintoperiodin arvioitu maksimi näyttää suosivan Lensun Gumbel I-jakauman avulla arvioitua maksimi-arvoa, joten voidaan olettaa sen painokertoimen olevan lähellä arvoa yksi suurimalle osalle havaintoperiodeista. Lensun menetelmän avulla arvioidun maksimi-arvon ajoittain edestakainen heitteleminen Lensun Gumbel I- ja Gumbel II-menetelmien avulla laskettujen arvojen välillä viittaa Lensun superpositiomenetelmän epäluotettavaan menettelytapaan. Lensun Gumbel I- ja superpositiomallin avulla arvioidut maksimi-arvot seuraavat parhaiten mitattua maksimi-arvoa, mutta heittelevät edestakaisin melko paljon. Gumbel II- ja Lensun Gumbel II-jakaumien avulla lasketut maksimi-arvon aikahistoriat liikkuvat hieman tasaisemmin ja enemmän mitattujen arvojen keskiarvon tasolla, vaikkakin Gumbel II-jakauman avulla lasketut maksimit alkavat suuremmalla havaintoperiodilla yliarvioimaan mitattuja arvoja.

Verrattaessa kuvaa 5.8 kuviin 5.9-5.15 voidaan tarkastella miten eri tilastolliset mallit reagoivat jääkuormasyötteen muutoksiin. Tarkasteltaessa kuvia 5.9-5.15 voidaan selvästi havaita, että Lensun Gumbel I- ja superpositiomenetelmät reagoivat eri jääkuorma-aikahistorian muutoksiin kaikkein voimakkaimmin, eksponentti-, Weibull- sekä Gumbel I-jakaumien reagoidessa jokaiseen muutokseen todella maltillisesti. Kuten oli

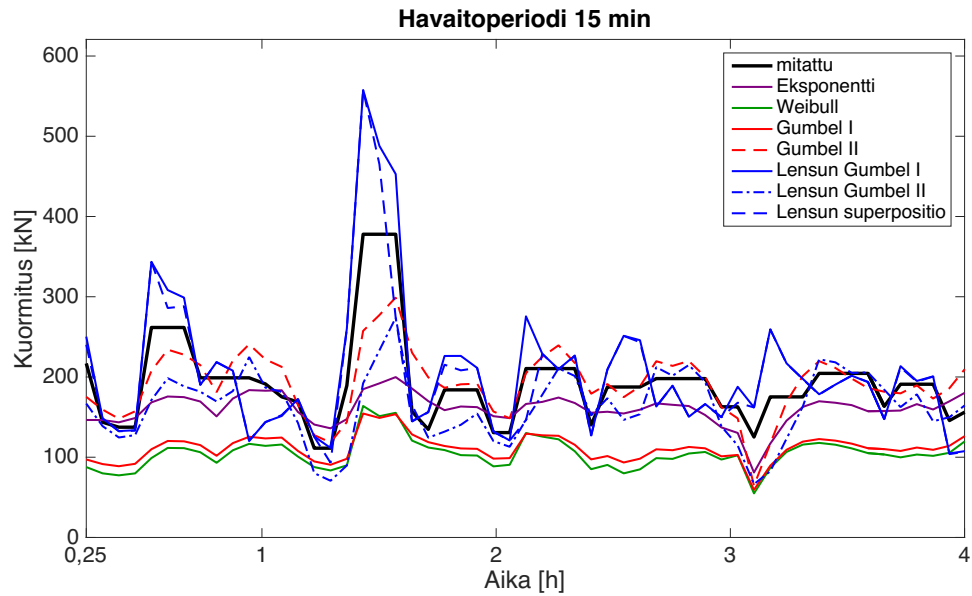
odotettavissa, kaikkien menetelmien avulla arvioitu maksimijääkuormataso myös nousee havaintoperiodin pidentyessä.

Noin yhden tunnin ja 20:n minuutin kohdalla jääkuorma-aikahistoriassa on havaittavissa kaksi suurta kuormitusamplitudia peräkkäin. Lyhyemmällä havaintoperiodeilla tapahtuma on selkeästi havaittavissa kaikissa havaintoperiodien arvioitujen maksimi-arvojen kuvaajissa. Lensun Gumbel I- ja superpositiomenetelmien kuvaajissa suuret kuormitusamplitudit voidaan havaita vielä 90 minuutin ja kahden tunnin havaintoperiodilla. Neljän tunnin havaintoperiodilla yksittäisiä jääkuorma-aikahistorian kuormitustapauksia ei ole havaittavissa, vaan kaikilla menetelmillä arvioidut havaintoperiodien maksimit pysyvät lähes vakioina.

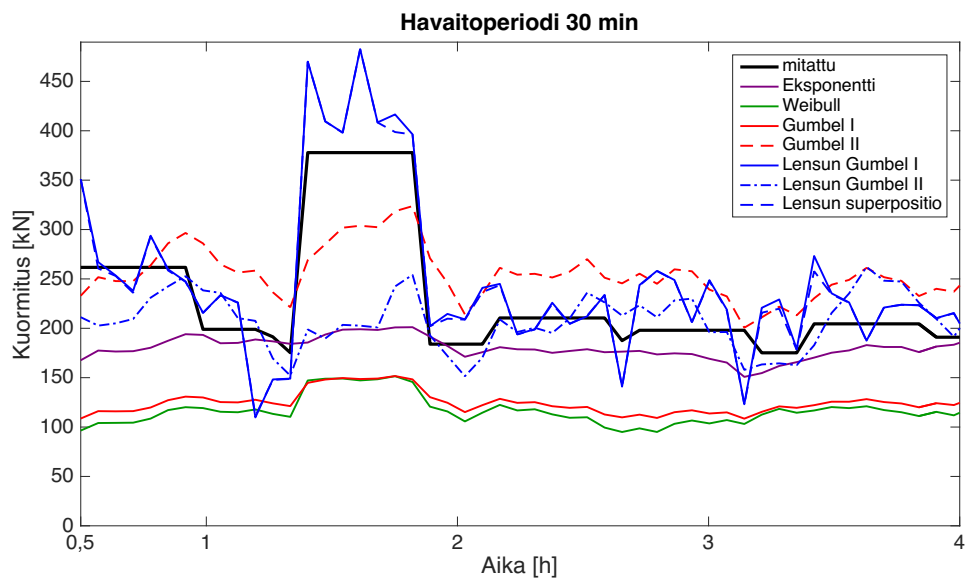
Taulukoiden 5.1-5.2 sekä kuvien 5.6-5.7 ja 5.9-5.15 perusteella voidaan todeta Lensun menetelmien soveltuvan mitta-aineistoon laskemiseen parhaiten. Täten tässä diplomityössä tullaan tästä eteenpäin ainoastaan tutkimaan Lensun menetelmiä.



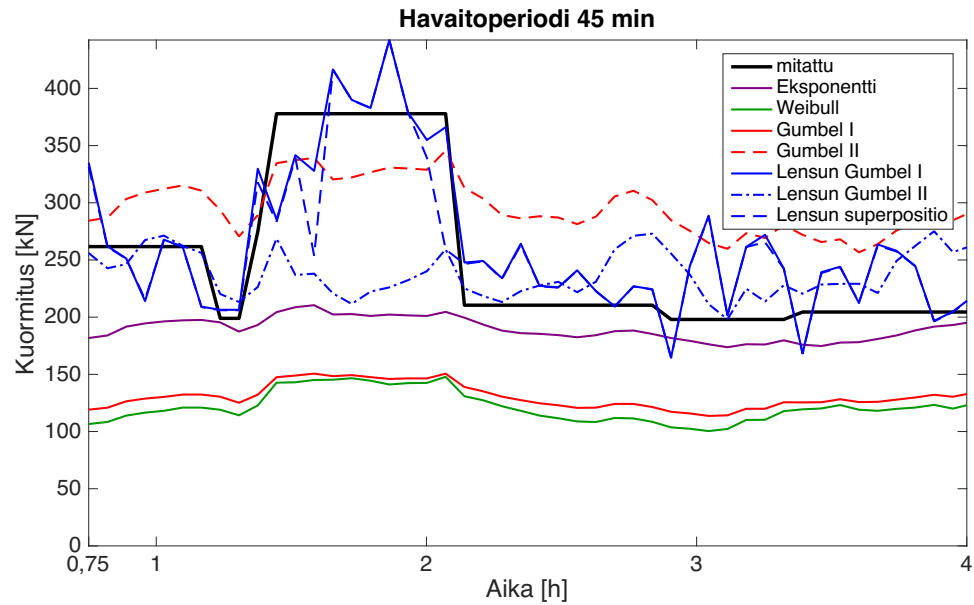
Kuva 5.8 Neljä ensimmäistä tuntia analysoidusta mittadatasta.



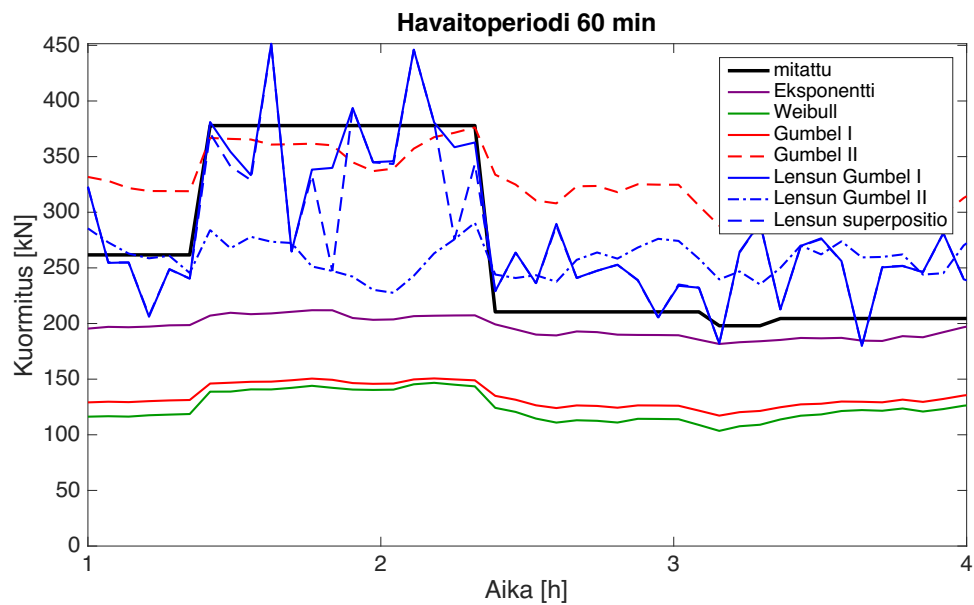
Kuva 5.9 Eri menetelmin arvioidut 15 minuutin todennäköisimmät maksimikuormat sekä mitatut maksimikuormat.



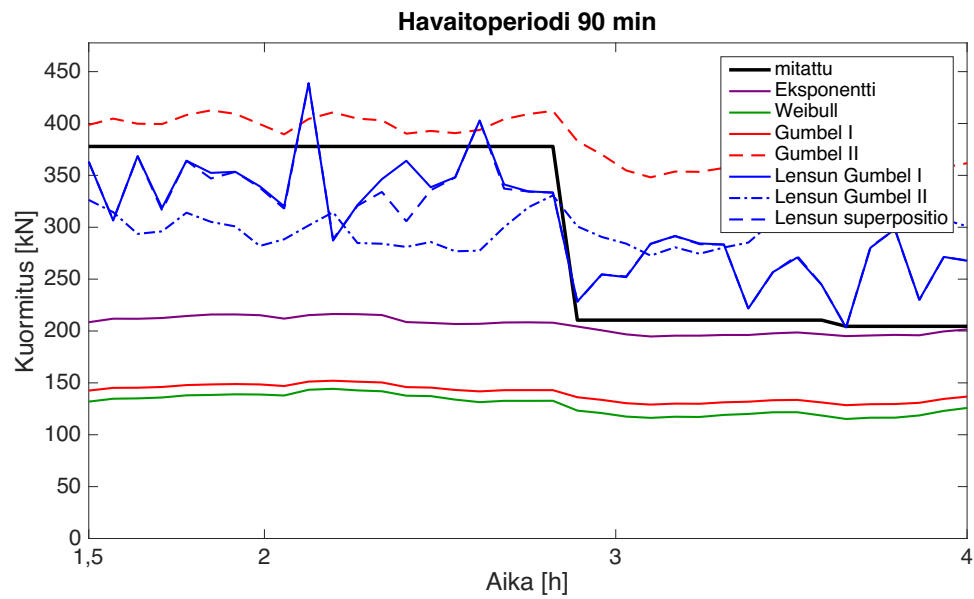
Kuva 5.10 Mitatut sekä eri menetelmillä arvioidut havaintoperiodien maksimijääkuormat havaintoperiodilla 30 minuuttia.



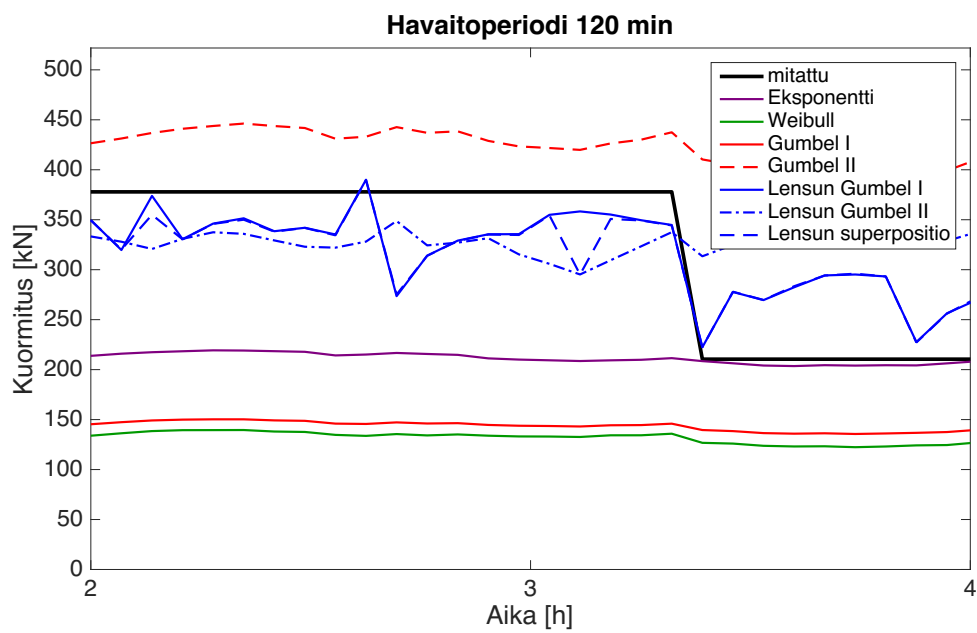
Kuva 5.11 Havaintoperiodilla 45 minuuttia mitatut sekä tilastollisin menetelmin arvioidut jääkuormamaksimit.



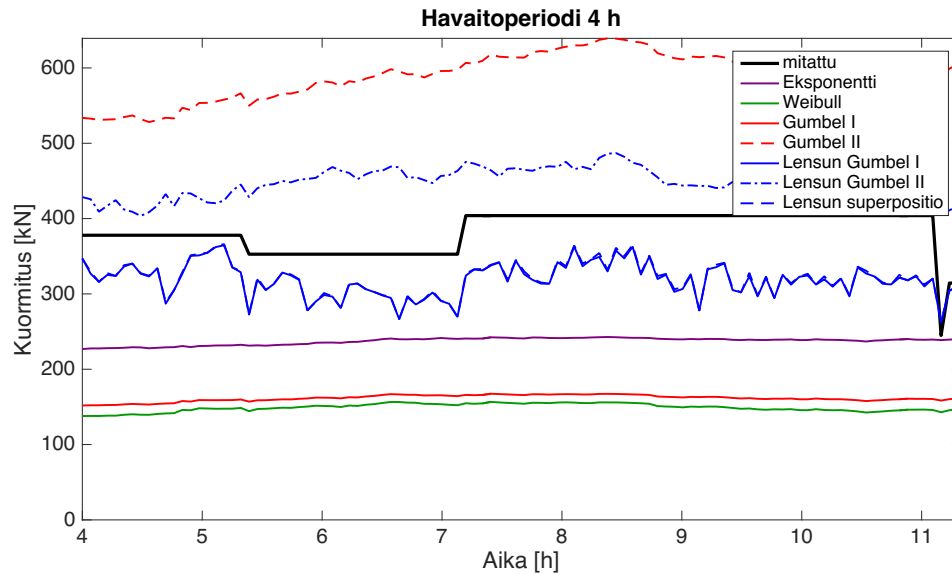
Kuva 5.12 Eri tilastollisin menetelmin arvioidut 60 minuutin havaintoperiodin todennäköisimmät maksimikuormat sekä mitatut maksimijääkuormat.



Kuva 5.13 Mitatut sekä eri menetelmillä arvioidut maksimijääkuormat havaintoperiodilla 90 minuuttia.



Kuva 5.14 Mitatut sekä eri menetelmillä arvioidut maksimijääkuormat kahden tunnin havaintoperiodilla.



Kuva 5.15 Mitatut sekä eri menetelmillä arvioidut maksimijääkuormat neljän tunnin havaintoperiodilla.

5.3 Vertailu tulevan ajanjakson maksimien kanssa

Tässä luvussa toistettiin sama maksimiarvon laskentaprosessi kuin luvussa 5.2 havaintoperiodeille 15, 30, 60, 90 ja 120 minuuttia, mutta aiemmasta poiketen tarkoituksena on ennustaa tulevan ajanjakson maksimiarvoa. Kutsuttakoon tätä tulevan ajanjakson maksimiarvoa ennustetuksi maksimiarvoksi. Havaintoperiodin lisäksi myös ennusteperiodia vaihdeltiin. Ennusteet laskettiin vain Lensun Gumbel I-, Gumbel II- ja superpositiomenetelmille. Jokaiselle havaintoperiodin arvolle laskettiin ennuste 15:lle ja 30:lle minuutille sekä yhdelle, kahdelle ja neljälle tunnille. Ennusteet laskettiin 11,33 tuntia pitkästä jääkuormamitta-aineistosta 4,17 minuutin väliajoin ja havaintoperiodeja oli yhteensä 77-160 kappaletta riippuen havaintoperiodin ja ennusteperiodin pituuksista.

Ennustettuja maksimiarvoja verrattiin tulevan ajanjakson mitatun maksimiampplitudin kanssa ja ennusteita ja mitattuja arvoja tarkasteltiin kahtena otoksena, joille suoritettiin 5 % merkitsevyystasolla kahden otoksen t-testi, Wilcoxonin kahden otoksen järjestyslukutesti sekä Kolmogorov-Smirnov -testi. Lisäksi laskettiin ennusteiden absoluuttiset keskivirheet sekä keskineliövirheiden neliöjuuret. Tulokset eri havaintoperiodeille on esitetty taulukoissa 5.3-5.7. Taulukon keskineliövirheiden neliöjuuret sekä ennusteperiodin että havaintoperiodin funktiona on myös esitetty graafisesti kuvissa 5.16 ja 5.17.

Taulukoista on havaittavista, että Lensun Gumbel I- ja superpositiomenetelmille hyväksyttiin eniten tilastollisia testejä ja suurin määrä hyväksyttyjä testejä saavutettiin Lensun Gumbel I- ja superpositiomenetelmien havainto- ja ennusteperiodien pituuksien ollessa lähellä toisiaan. Lensun Gumbel II-menetelmälle hyväksyttiin eniten testejä ennusteperiodin ollessa lyhyempi. Wilcoxonin kahden otoksen järjestyslukutesti hylättiin kaikille ennustemalleille lukuun ottamatta 15 ja 30 minuutin havainto- sekä ennusteperiodeilla estimoituja Lensun Gumbel I- ja superpositioennusteita. Lähes kaikki tilastolliset testit hylättiin neljän tunnin ennusteperiodilla. Virheavrot Lensun Gumbel

II-jakauman ennusteille ovat merkittävästi pienempiä kuin Lensun Gumbel I- ja superpositiomenetelmien ennusteiden virhearvot.

Vaikka Lensun Gumbel II-menetelmälle hyväksyttiin vähemmän tilastollisia testejä kuin Lensun Gumbel I- ja superpositiomenetelmille, voidaan taulukoissa 5.3-5.7 esitettyjen virhearvojen perusteella todeta, Lensun Gumbel II-menetelmän soveltuvan parhaiten tulevien jääkuormien ennustamiseen.

Tulosten perusteella voidaan todeta, että Lensun Gumbel II-menetelmän ennusteet ovat kohtalaisen luotettavia kaikilla havainto- sekä ennusteperiodeilla. Kuten oli odotettavissa ja kuten kuvasta 5.16 voidaan todeta, virheet suurenevat ennusteperiodin kasvaessa kaikilla paitsi neljän tunnin ennusteperiodilla. Vastaavasti virheet pienenevät havaintoperiodin kasvaessa, kuten myös kuvasta 5.17 voidaan todeta. Virheiden muutos kuitenkin tasaantuu havaintoperiodin pidentyessä ja havaintoperiodeilla 60, 90 ja 120 minuuttia, virhe säilyy lähes vakiona. Tämän diplomityön tavoitteen ollessa mahdollisimman lyhyen havaintoperiodin pohjalta ennustaminen, valitaan operatiivisen jääkuormamonitorointijärjestelmän ennustemallin havaintoperiodiksi 60 minuuttia.

Voidaan myös todeta, että 60:n minuutin havaintoperiodilla virhearvot eivät huomattavasti nouse ennusteperiodin kasvaessa. Täten taulukoissa 5.3-5.7 esitettyjen tulosten perusteella voidaan todeta, että Lensun Gumbel II-jakauman ennustemallilla maksimijääkuorma voidaan ennustaa lähes yhtä luotettavasti 15:lle ja 60:lle minuutille sekä yhdelle, kahdelle ja neljälle tunnille. Huomattakoon, että virhe on kaikkein suurin kahden tunnin ennusteperiodilla.

Taulukko 5.3 15 minuutin havaintoperiodilla ennustettujen arvojen tilastollisten testien tulokset, ennusteiden absoluuttiset keskivirheet sekä keskineliövirheiden neliöjuuret.

Ennuste- periodi	Menetelmä	T-testi	Wilcoxonin järjestys- lukutesti	Kolmogorov- Smirnov -testi	MAE [kN]	RMSE [kN]
15 min	Lensu Gumbel I	Hyväksytty	Hylätty	Hyväksytty	80,8	118,4
	Lensu Gumbel II	Hyväksytty	Hyväksytty	Hylätty	56,1	84,0
	Lensu superpositio	Hyväksytty	Hylätty	Hyväksytty	77,3	114,6
30 min	Lensu Gumbel I	Hyväksytty	Hylätty	Hyväksytty	106,3	148,2
	Lensu Gumbel II	Hyväksytty	Hylätty	Hyväksytty	73,0	94,9
	Lensu superpositio	Hyväksytty	Hylätty	Hyväksytty	102,7	143,5
1 h	Lensu Gumbel I	Hyväksytty	Hylätty	Hyväksytty	126,7	168,2
	Lensu Gumbel II	Hylätty	Hylätty	Hyväksytty	86,9	105,7
	Lensu superpositio	Hyväksytty	Hylätty	Hyväksytty	123,2	163,5
2 h	Lensu Gumbel I	Hylätty	Hylätty	Hyväksytty	149,4	199,8
	Lensu Gumbel II	Hylätty	Hylätty	Hylätty	94,1	118,7
	Lensu superpositio	Hylätty	Hylätty	Hyväksytty	146,5	195,1
4 h	Lensu Gumbel I	Hylätty	Hylätty	Hyväksytty	162,8	211,1
	Lensu Gumbel II	Hylätty	Hylätty	Hylätty	97,7	132,3
	Lensu superpositio	Hylätty	Hylätty	Hyväksytty	153,6	210,4

Taulukko 5.4 30 minuutin havaintoperiodilla ennustettujen arvojen tilastollisten testien tulokset, ennusteiden absoluuttiset keskivirheet sekä keskineliövirheiden neliöjuuret.

<i>Ennuste- periodi</i>	<i>Menetelmä</i>	<i>T-testi</i>	<i>Wilcoxonin järjestys- lukutesti</i>	<i>Kolmogorov- Smirnov -testi</i>	<i>MAE [kN]</i>	<i>RMSE [kN]</i>
15 min	Lensu Gumbel I	Hyväksytty	Hyväksytty	Hyväksytty	81,9	109,3
	Lensu Gumbel II	Hyväksytty	Hylätty	Hylätty	53,8	77,1
	Lensu superpositio	Hyväksytty	Hyväksytty	Hyväksytty	81,7	108,7
30 min	Lensu Gumbel I	Hyväksytty	Hyväksytty	Hyväksytty	93,9	123,8
	Lensu Gumbel II	Hylätty	Hylätty	Hyväksytty	59,6	81,0
	Lensu superpositio	Hyväksytty	Hyväksytty	Hyväksytty	93,3	123,3
1 h	Lensu Gumbel I	Hyväksytty	Hylätty	Hyväksytty	111,5	141,3
	Lensu Gumbel II	Hylätty	Hylätty	Hyväksytty	76,4	88,3
	Lensu superpositio	Hyväksytty	Hylätty	Hyväksytty	110,6	140,7
2 h	Lensu Gumbel I	Hyväksytty	Hylätty	Hyväksytty	132,4	165,7
	Lensu Gumbel II	Hylätty	Hylätty	Hylätty	77,9	95,0
	Lensu superpositio	Hyväksytty	Hylätty	Hyväksytty	132,3	165,4
4 h	Lensu Gumbel I	Hylätty	Hylätty	Hylätty	132,0	158,8
	Lensu Gumbel II	Hylätty	Hylätty	Hylätty	75,8	94,1
	Lensu superpositio	Hylätty	Hylätty	Hylätty	131,2	158,1

Taulukko 5.5 60 minuutin havaintoperiodilla ennustettujen arvojen tilastollisten testien tulokset, ennusteiden absoluuttiset keskivirheet sekä keskineliövirheiden neliöjuuret.

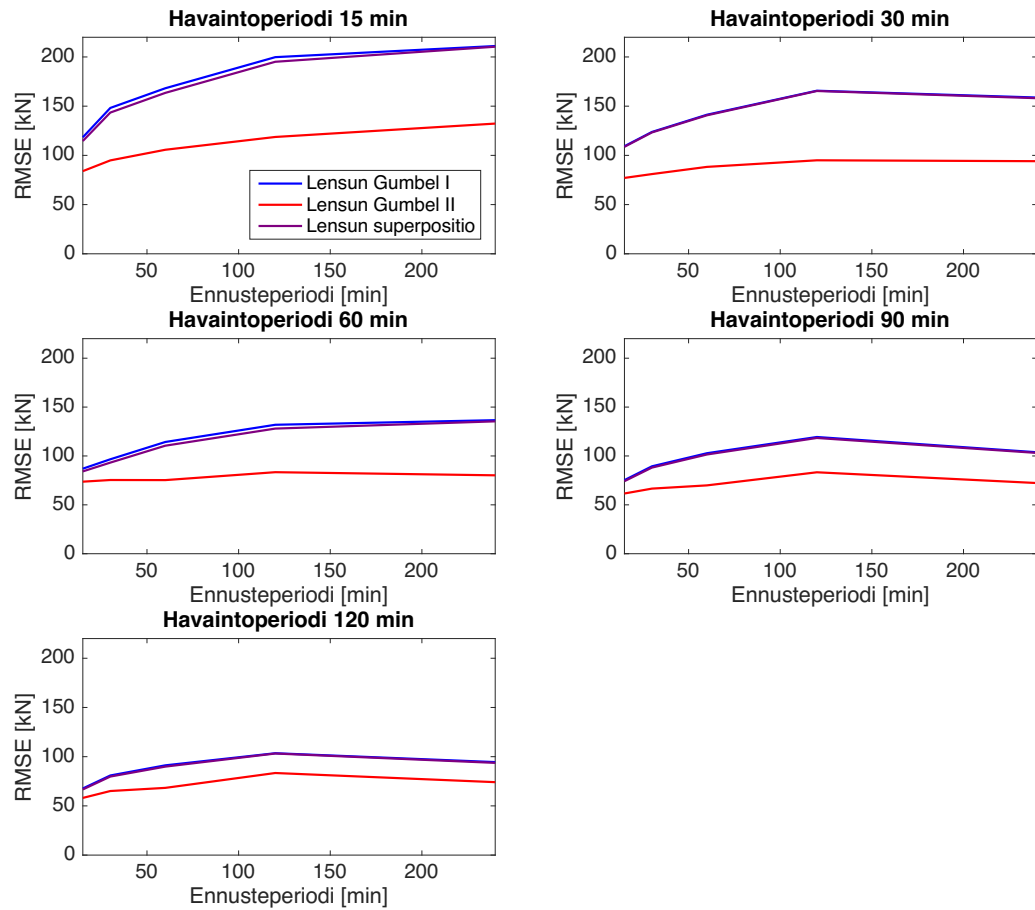
<i>Ennuste- periodi</i>	<i>Menetelmä</i>	<i>T-testi</i>	<i>Wilcoxonin järjestys- lukutesti</i>	<i>Kolmogorov- Smirnov -testi</i>	<i>MAE [kN]</i>	<i>RMSE [kN]</i>
15 min	Lensu Gumbel I	Hylätty	Hylätty	Hyväksytty	63,5	87,0
	Lensu Gumbel II	Hyväksytty	Hylätty	Hylätty	48,9	73,7
	Lensu superpositio	Hylätty	Hylätty	Hyväksytty	59,2	84,2
30 min	Lensu Gumbel I	Hylätty	Hylätty	Hyväksytty	73,4	96,6
	Lensu Gumbel II	Hylätty	Hylätty	Hyväksytty	55,0	75,4
	Lensu superpositio	Hyväksytty	Hylätty	Hyväksytty	69,1	93,2
1 h	Lensu Gumbel I	Hyväksytty	Hylätty	Hyväksytty	92,5	114,3
	Lensu Gumbel II	Hylätty	Hylätty	Hyväksytty	66,4	75,3
	Lensu superpositio	Hyväksytty	Hylätty	Hyväksytty	88,2	110,5
2 h	Lensu Gumbel I	Hyväksytty	Hylätty	Hyväksytty	114,4	131,9
	Lensu Gumbel II	Hylätty	Hylätty	Hylätty	67,1	83,4
	Lensu superpositio	Hyväksytty	Hylätty	Hyväksytty	111,1	128,0
4 h	Lensu Gumbel I	Hylätty	Hylätty	Hylätty	115,5	136,6
	Lensu Gumbel II	Hylätty	Hylätty	Hylätty	64,8	80,2
	Lensu superpositio	Hylätty	Hylätty	Hylätty	113,8	135,4

Taulukko 5.6 90 minuutin havaintoperiodilla ennustettujen arvojen tilastollisten testien tulokset, ennusteiden absoluuttiset keskivirheet sekä keskineliövirheiden neliöjuuret.

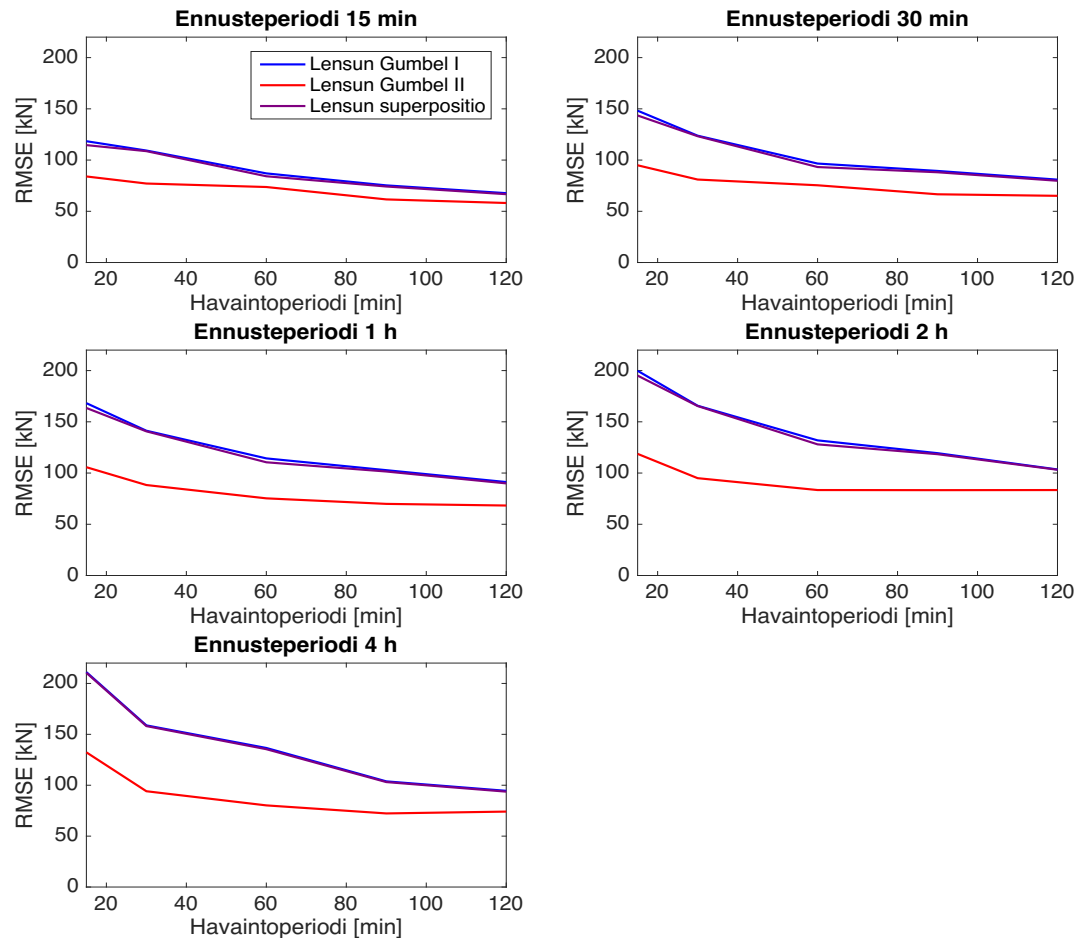
<i>Ennuste- periodi</i>	<i>Menetelmä</i>	<i>T-testi</i>	<i>Wilcoxonin järjestys- lukutesti</i>	<i>Kolmogorov- Smirnov -testi</i>	<i>MAE [kN]</i>	<i>RMSE [kN]</i>
15 min	Lensu Gumbel I	Hylätty	Hylätty	Hyväksytty	52,6	75,3
	Lensu Gumbel II	Hyväksytty	Hylätty	Hylätty	41,8	61,6
	Lensu superpositio	Hylätty	Hylätty	Hyväksytty	51,1	74,2
30 min	Lensu Gumbel I	Hylätty	Hylätty	Hyväksytty	69,0	89,4
	Lensu Gumbel II	Hylätty	Hylätty	Hyväksytty	47,8	66,6
	Lensu superpositio	Hylätty	Hylätty	Hyväksytty	67,4	88,1
1 h	Lensu Gumbel I	Hyväksytty	Hylätty	Hyväksytty	85,9	102,8
	Lensu Gumbel II	Hylätty	Hylätty	Hylätty	62,6	69,9
	Lensu superpositio	Hyväksytty	Hylätty	Hyväksytty	84,7	101,5
2 h	Lensu Gumbel I	Hyväksytty	Hylätty	Hyväksytty	107,3	119,4
	Lensu Gumbel II	Hylätty	Hylätty	Hylätty	67,0	83,3
	Lensu superpositio	Hyväksytty	Hylätty	Hyväksytty	106,6	118,4
4 h	Lensu Gumbel I	Hylätty	Hylätty	Hylätty	91,4	103,8
	Lensu Gumbel II	Hylätty	Hylätty	Hylätty	60,5	72,3
	Lensu superpositio	Hylätty	Hylätty	Hylätty	90,5	103,1

Taulukko 5.7 Kahden tunnin havaintoperiodilla ennustettujen arvojen tilastollisten testien tulokset, ennusteiden absoluuttiset keskivirheet sekä keskineliövirheiden neliöjuuret.

<i>Ennuste- periodi</i>	<i>Menetelmä</i>	<i>T-testi</i>	<i>Wilcoxonin järjestys- lukutesti</i>	<i>Kolmogorov- Smirnov -testi</i>	<i>MAE [kN]</i>	<i>RMSE [kN]</i>
15 min	Lensu Gumbel I	Hylätty	Hylätty	Hyväksytty	49,4	67,7
	Lensu Gumbel II	Hyväksytty	Hylätty	Hylätty	40,2	58,1
	Lensu superpositio	Hylätty	Hylätty	Hyväksytty	48,5	66,7
30 min	Lensu Gumbel I	Hylätty	Hylätty	Hyväksytty	63,4	80,9
	Lensu Gumbel II	Hylätty	Hylätty	Hyväksytty	45,9	65,1
	Lensu superpositio	Hylätty	Hylätty	Hyväksytty	62,0	79,8
1 h	Lensu Gumbel I	Hylätty	Hylätty	Hyväksytty	78,2	91,2
	Lensu Gumbel II	Hylätty	Hylätty	Hylätty	63,0	68,3
	Lensu superpositio	Hylätty	Hylätty	Hyväksytty	76,8	89,9
2 h	Lensu Gumbel I	Hyväksytty	Hylätty	Hyväksytty	93,2	103,5
	Lensu Gumbel II	Hylätty	Hylätty	Hylätty	66,4	83,4
	Lensu superpositio	Hyväksytty	Hylätty	Hyväksytty	93,4	103,2
4 h	Lensu Gumbel I	Hylätty	Hylätty	Hylätty	83,5	94,5
	Lensu Gumbel II	Hylätty	Hylätty	Hylätty	58,7	74,1
	Lensu superpositio	Hylätty	Hylätty	Hylätty	82,6	93,7



Kuva 5.16 Keskineliövirheen neliöjuurten arvot eri havaintoperiodeille ennusteperiodin muuttuessa 15 minuutin ja 4 tunnin välillä.



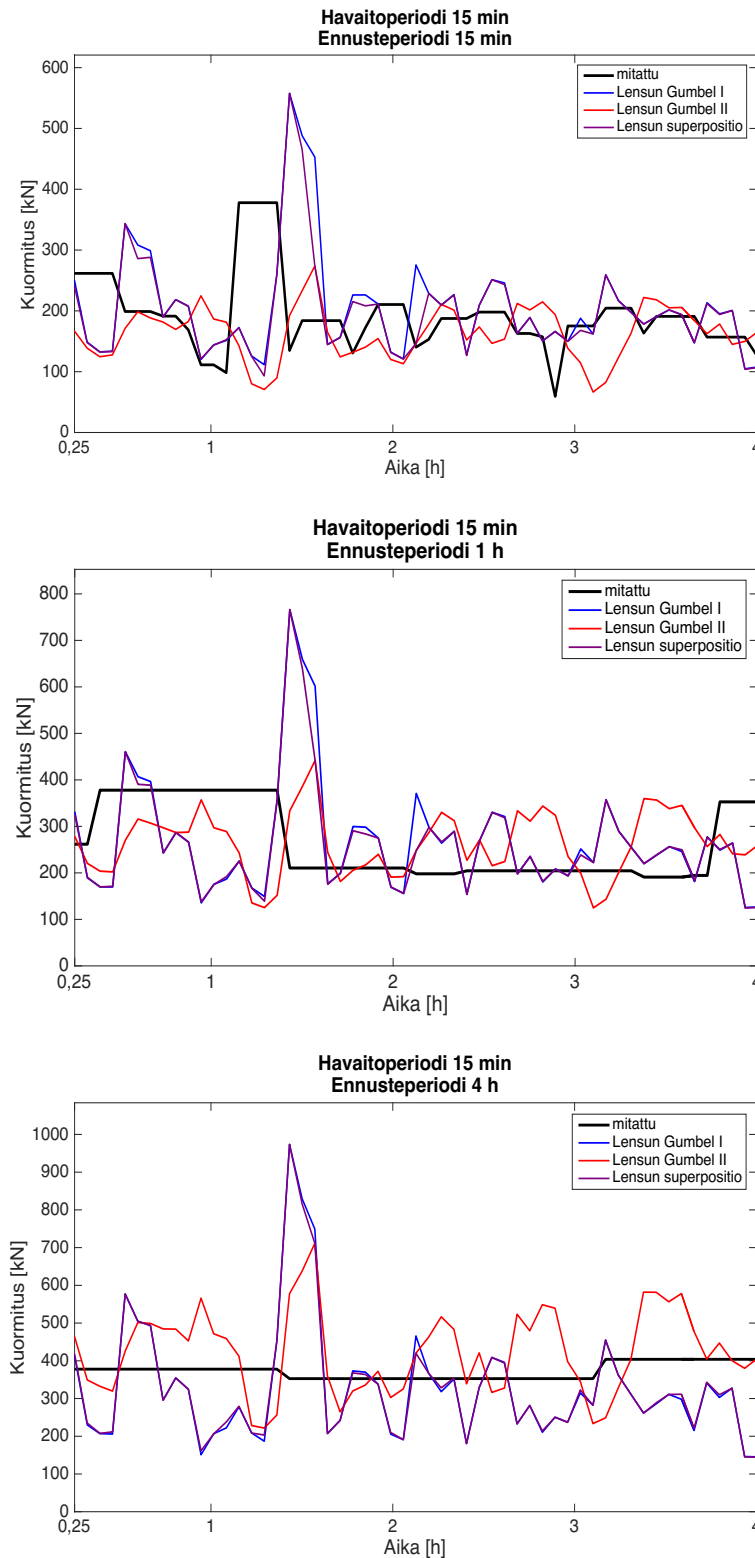
Kuva 5.17 Keskineliövirheiden neliöjuuret 15 ja 30 minuutin sekä yhden, kahden ja neljän tunnin ennusteperiodeille.

Lisäksi tulevan ajanjakson mitattuja maksimijääkuormia ja ennustettuja maksimijääkuormia vertailtiin visuaalisesti tarkastelemalla aikajanaa, jossa ennustetut arvot on kuvattu mitattujen arvojen ohessa. Kuvissa 5.18-5.20 on esitetty mitatut maksimi-amplitudit sekä ennustetut todennäköisimmät maksimikuormat osalle havainto- ja ennusteperiodeista. Ainoastaan neljä ensimmäistä tuntia 11,33 tunnin aikahistoriasta on kuvattuna, jotta erotukset näkyisivät selvemmin. Poikkeuksena kahden tunnin havaintoperiodi, josta on kuvattuna kuusi ensimmäistä tuntia.

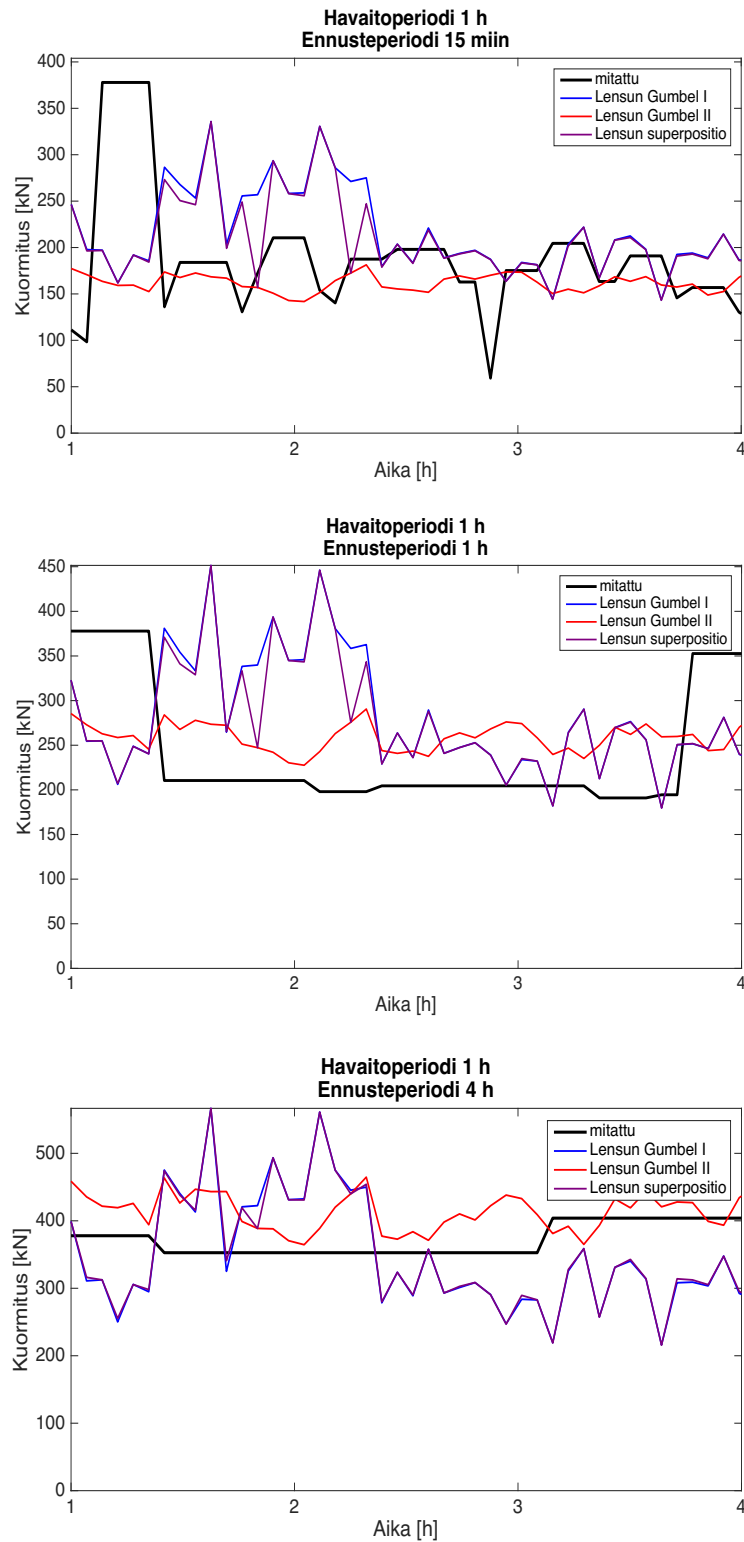
Kuvista 5.18-5.20 on havaittavissa, että pidemmällä havaintoperiodilla mitattu maksimijääkuorman aikajana on tasaisempi kuin lyhyellä havaintoperiodilla, sillä sama jääkuormituspiikki on tällöin pidempään maksimikuormana. Ennusteen arvot kuitenkin vaihtelevat jatkuvasti mitta-aineiston perusteella. Erittäin suuren kuorman osuessa havaintoperiodiin, ennuste yliarvioi mitattua kuormaa, etenkin lyhyellä havaintoperiodilla, jonka vuoksi liian lyhyttä havaintoperiodia tulisi välttää. Kuvista voidaan myös selkeästi nähdä, miksi ennustetuille arvoille ei usein hyväksytä tilastollisia testejä. Kuvista on havaittavissa, että ennustettujen ja mitattujen arvojen keskiarvot ja mediaanit eivät ole yhtä suuria, varsinkaan pitkällä ennuste- ja havaintoperiodeilla.

Kuten todettiin myös taulukoista 5.3-5.7, ennusteet saavuttavat mitattuja arvoja lähempiä arvoja havaintoperiodin ollessa pitkä, jolloin ennusteen arvot eivät vaihtelee niin

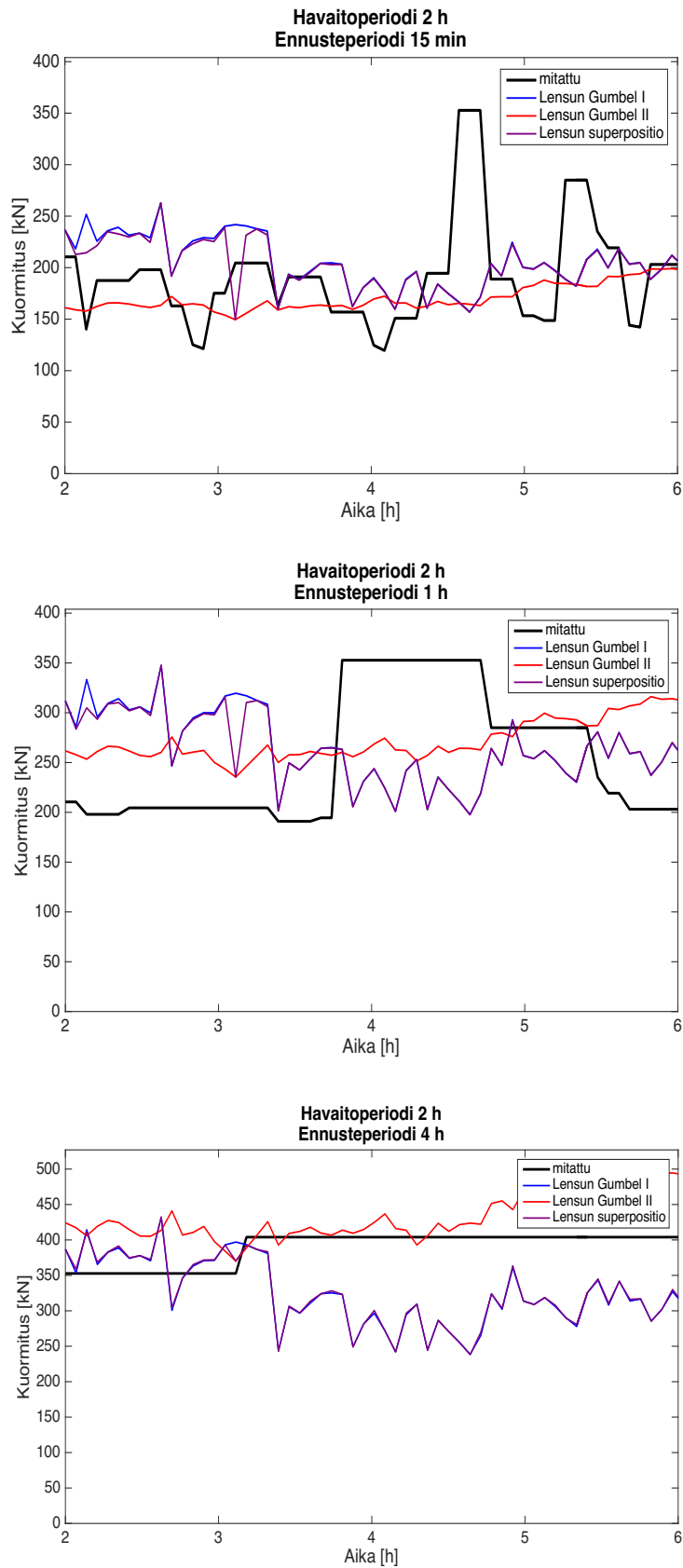
paljon. Vaikka ennusteille ei hyväksytty tilastollisia testejä, on ennusteiden kuormitus-taso pidemmällä havaintoperiodilla lähes samaa luokkaa kuin mitatut maksimiarvot. Myös kuvien 5.18-5.20 perusteella Lensun Gumbel II-jakauman ennustemalli on toimivin käytetyille mitta-aineistolle.



Kuva 5.18 15, 60 minuutin sekä neljän tunnin ennusteperiodin mitatut sekä eri menetelmillä ennustetut maksimijääkuormat 15 minuutin havaintoperiodilla.



Kuva 5.19 15, 60 minuutin sekä neljän tunnin ennusteperiodin mitatut sekä eri menetelmillä ennustetut maksimijääkuormat 60 minuutin havaintoperiodilla.



Kuva 5.20 15, 60 minuutin sekä neljän tunnin ennusteperiodin mitatut sekä eri menetelmillä ennustetut maksimijääkuormat kahden tunnin havaintoperiodilla.

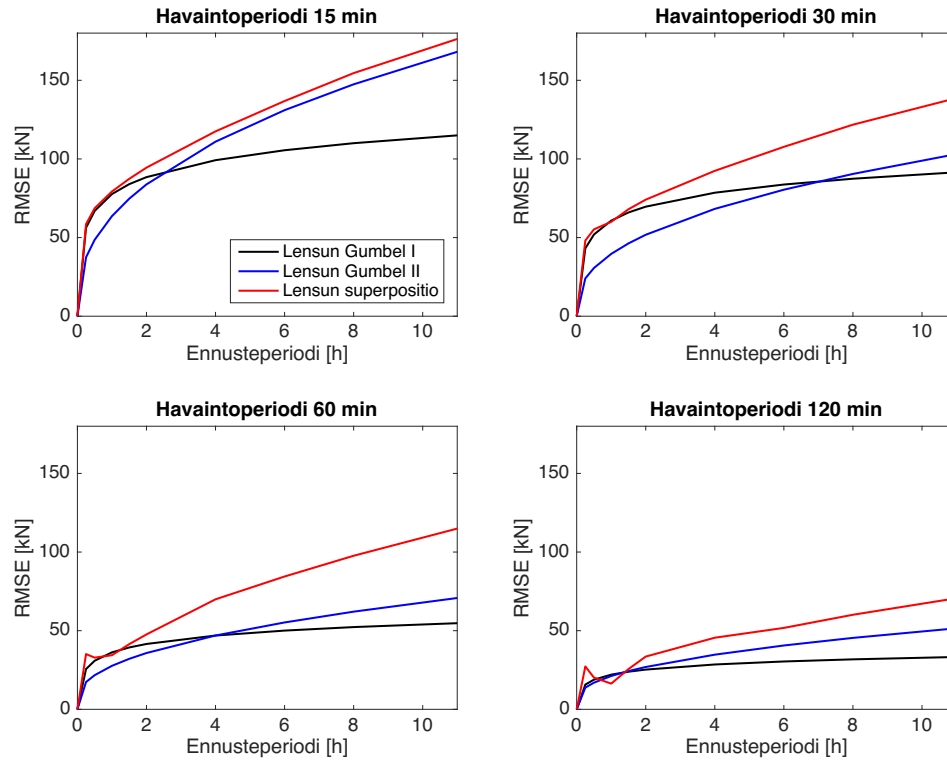
5.4 Vertailu koko mitatun aikahistorian ennusteen kanssa

Lensun Gumbel I-, Gumbel II- ja superpositiomenetelmien eri havainto- ja ennuste-periodien jääkuormamaksimi-arvojen ennusteita verrattiin myös Lensun menetelmille koko 11,33 tuntia pitkän mitatun aikahistorian ennusteen kanssa. Ensiksi laskettiin koko aikahistorian ennuste eri ennusteperiodoille, ja arvoja verrattiin eri pituisten lyhyempien havaintoperiodien samojen ennusteperiodien ennusteille. Taulukossa 5.8 on esitetty eri havaintoperiodien ennusteiden absoluuttiset keskivirheet sekä keskineliövirheiden neliöjuuret koko 11,33 tunnin mitta-aineiston ennusteesta. Lisäksi keskineliövirheen neliöjuuret eri havaintoperiodille ennusteperiodin funktiona on esitetty kuvassa 5.21.

Kuten oli odotettavissa, taulukosta 5.8 ja kuvasta 5.21 on havaittavissa, että keskineliövirheen neliöjuuri pienenee havaintoperiodin kasvaessa, sillä tällöin mitta-aineisto on lähempänä koko 11,33 tuntia pitkää mitta-aineistoa. Lisäksi keskineliövirheen neliöjuuri kasvaa ennusteperiodin pidentyessä. Huomattakoon kuitenkin, että keskineliövirheen neliöjuuri ei kasva lineaarisesti, vaan alkuun jyrkemmin ja tämän jälkeen kasvu tasaantuu. Voidaan siis todeta, että keskineliövirheen neliöjuurten eroavaisuus yhden, neljän ja 11 tunnin ennusteperiodien välillä ei ole merkittävä.

Taulukko 5.8 Koko 11,33 tuntia pitkän jääkuorma-aikahistorian ennusteen verailu lyhyempien havaintoperiodien ennusteiden kanssa.

Havainto- periodi	Ennuste- periodi	MAE [kN]			RMSE [kN]		
		Lensun Gumbel I	Lensun Gumbel II	Lensun superpositio	Lensun Gumbel I	Lensun Gumbel II	Lensun superpositio
15 min	15 min	8,7	1,7	19,3	56,2	37,4	58,5
	30 min	10,5	2,3	19,5	66,9	48,6	68,6
	1 h	12,3	2,7	4,2	77,7	63,6	79,3
	4 h	15,9	3,3	3,2	99,2	111,0	117,5
	11 h	18,5	2,7	30,4	115,0	168,1	176,3
30 min	15 min	6,2	1,2	19,5	43,1	24,1	48,1
	30 min	7,6	1,7	17,8	51,9	30,7	55,2
	1 h	8,9	2,2	2,2	60,8	39,6	60,0
	4 h	11,5	3,3	9,7	78,5	68,3	92,4
	11 h	13,4	4,1	19,8	91,5	103,1	138,7
1 h	15 min	5,7	1,6	20,5	25,6	17,4	35,1
	30 min	6,8	2,3	13,3	30,9	21,7	32,9
	1 h	8,0	3,1	0,4	36,2	27,7	34,4
	4 h	10,3	5,6	9,4	46,9	46,9	70,0
	11 h	12,0	8,1	21,6	54,8	70,8	114,9
2 h	15 min	6,0	1,3	17,0	20,6	15,3	32,6
	30 min	7,3	1,9	10,4	24,9	18,9	27,3
	1 h	8,5	2,7	0,9	29,2	23,9	27,5
	4 h	11,0	5,2	12,7	37,8	40,1	60,4
	11 h	12,8	7,8	18,8	44,2	60,1	94,3



Kuva 5.21 15, 30, 60 ja 120 minuuttia pitkien havaintoperiodien ennusteiden keskineliövirheen neliöjuuri, olettaen, että koko 11,33 tunnin mitta-aineiston ennuste olisi oikea maksimiamplitudi

5.5 Lensun ennustemallien aikaikkunan pituuden tutkiminen

Lensun ennustemallien aikaikkunan pituuden vaikutusta ennusteen luotettavuuteen tutkittiin vertaamalla eri aikaikkunan pituuksilla laskettuja Lensun Gumbel I, Gumbel II- ja superpositioennusteita tulevan ajanjakson mitattuun maksimijääkuormaan. Havaintoperiodina sekä ennusteperiodina käytettiin pituuksia 15, 30, 60 ja 120 minuuttia ja ennusteet laskettiin aikaikkunan pituuksilla 3,6 , 9, 18, 45, 90 ja 180 sekuntia. Ennusteet laskettiin 80 000 mittapisteen eli 6,7 minuutin välein, jolloin havaintoperiodeita oli yhteensä 66-98 kappaletta riippuen havaintoperiodin pituudesta. Ennusteiden absoluuttiset keskivirheet ja keskineliövirheiden neliöjuuret eri aikaikkunan pituuksille on esitetty taulukossa 5.9, ja edustava esimerkki absoluuttisesta keskivirheestä aikaikkunan pituuden funktiona havaintoperiodilla 60 minuuttia on myös esitetty graafisesti kuvassa 5.22.

Kuten taulukosta 5.9 on havaittavissa Lensun Gumbel I- ja superpositiomenetelmille aikaikkunan pidentyessä absoluuttiset keskivirheet ja keskineliövirheen neliöjuuret pienenevät merkittävästi. Tätä havainnollistaa myös kuvan 5.22 tapaus. Aikaikkunan pituuden vaikutus ennusteen virhearvoihin on huomattavin havaintoperiodin pituuden ollessa lyhyt ja vaikutus pienenee havaintoperiodin pidentyessä. Lensun Gumbel II-menetelmälle virhearvot vaihtelevat kaikille aikaikkunan pituuksille lähes samalla tasolla eli aikaikkunan pituus ei juuri vaikuta virheisiin. Tämä vahvistaa sen, mitä todettiin luvussa 4.6.1 eli, että Lensun Gumbel II-menetelmä ja skaalauskorrelaatio (4.43) toimii hyvin lyhyille aikaikkunoille, Lensun Gumbel I-menetelmän ja skaalaus-

korrelaation (4.44) pätiessä yleensä pidemmälle aikaikkunalle. Lensun superpositiomenetelmä seuraa aikaisempien tulosten perusteella yleisesti Lensun Gumbel I-menetelmää, jonka vuoksi superpositiomenetelmä toimii myös parhaiten pidemmällä aikaikkunan pituudella.

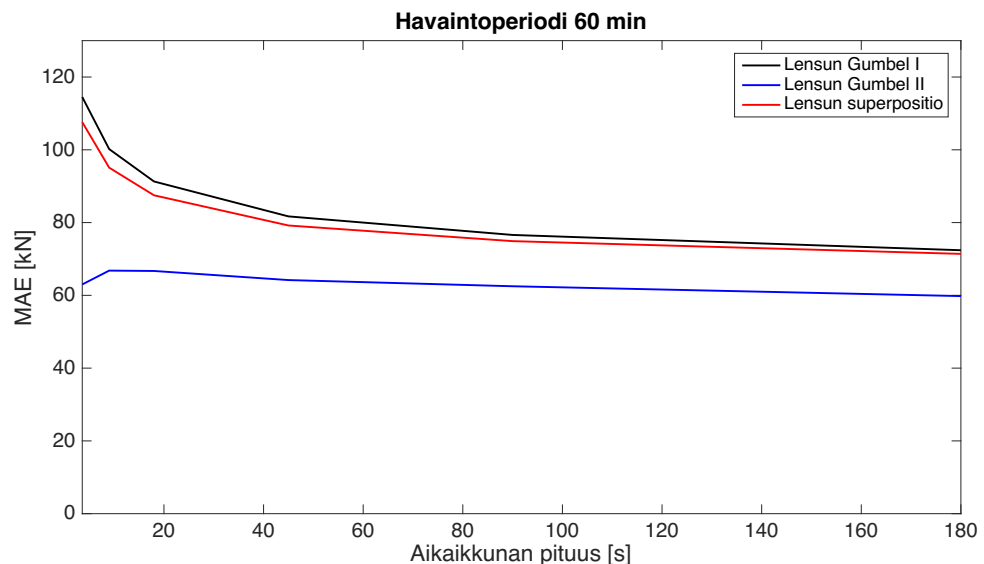
Täten voidaan todeta, että Lensun Gumbel I- ja superpositiomenetelmille soveltuvan kaikki aikaikkunan pituudet 45-180 sekuntiin, Lensun Gumbel II-menetelmälle soveltuessa mikä vaan testatuista aikaikkunan pituuksista.

Aikaikkunan vähäinen vaikutus ennustearvon luotettavuuteen johtuu pääasiallisesti siitä, että luvussa 4.6.1 määritellyt Hurstin eksponentti sekä H' -arvo eivät määrydy valitun aikaikkunan mukaan. Sen sijaan Hurstin eksponentti ja H' -arvo lasketaan varioimalla aikaikkunan pituutta ja laskemalla eri aikaikkunan pituuksille keskimääräiset maksimikuormat. Hurstin eksponentti ja H' -arvo saadaan tämän jälkeen luomalla (T, y_T) -kuvaajat eri asteikoille ja määrittämällä kuvaajien kulmakertoimet. Kuten kuvasta 4.7 oli havaittavissa aikaikkunan keskimääräinen kuormitusmaksimin ja aikaikkunan pituuden riippuvuus on melko lineaarinen, johtaen aikaikkunan heikkoon vaikutukseen. Lensun Gumbel II-jakaumaan käytetty Hurstin eksponentti oli lineaarinen melkein koko (T, y_T) -kuvaajassa, Lensun Gumbel II-jakaumaan käytetyn H' -arvon ollessa lineaarinen vain osan kuvaajasta. Tämä johtaa aikaikkunan suurempaan vaikutukseen Lensun Gumbel I-jakauman kohdalla. Lensun superpositiomenetelmän seuratussa pääasiallisesti Lensun Gumbel I-jakaumaa, on myös aikaikkunan vaikutus Lensun superpositiomenetelmässä suurempi kuin Lensun Gumbel II-menetelmän kohdalla.

Taulukko 5.9 Eri havaintoperiodilla ennustettujen arvojen tilastollisten testien tulokset, ennusteiden absoluuttiset keskivirheet sekä keskineliövirheiden neliöjuuret, aikaikkunan pituuden varioidessa 3,6 - 180 sekuntiin.

<i>Ennuste- sekä havainto-periodi</i>	<i>Aikaikkunan pituus</i>	<i>Menetelmä</i>	<i>MAE [kN]</i>	<i>RMSE [kN]</i>
15 min	3,6 s	Lensun Gumbel I	120,3	175,7
		Lensun Gumbel II	55,4	83,3
		Lensun superpositio	112,8	168,6
	9 s	Lensun Gumbel I	102,2	147,2
		Lensun Gumbel II	54,4	82,5
		Lensun superpositio	96,8	142,1
	18 s	Lensun Gumbel I	89,7	128,4
		Lensun Gumbel II	54,3	82,3
		Lensun superpositio	86,0	124,8
	45 s	Lensun Gumbel I	76,8	108,0
		Lensun Gumbel II	53,3	82,4
		Lensun superpositio	75,2	106,2
	90 s	Lensun Gumbel I	69,4	97,1
		Lensun Gumbel II	54,7	84,0
		Lensun superpositio	68,9	96,3
	180 s	Lensun Gumbel I	64,4	90,7
		Lensun Gumbel II	58,9	86,9
		Lensun superpositio	64,4	90,7
30 min	3,6 s	Lensun Gumbel I	122,2	162,1
		Lensun Gumbel II	59,8	82,7
		Lensun superpositio	120,5	160,5
	9 s	Lensun Gumbel I	104,6	138,8
		Lensun Gumbel II	61,2	82,3
		Lensun superpositio	103,2	137,7
	18 s	Lensun Gumbel I	92,9	123,9
		Lensun Gumbel II	61,1	81,9
		Lensun superpositio	91,8	123,1
	45 s	Lensun Gumbel I	80,1	108,4
		Lensun Gumbel II	60,1	81,6
		Lensun superpositio	79,5	108,1
	90 s	Lensun Gumbel I	71,9	99,7
		Lensun Gumbel II	58,6	81,5
		Lensun superpositio	71,5	99,6
	180 s	Lensun Gumbel I	65,7	94,2
		Lensun Gumbel II	57,7	83,1
		Lensun superpositio	66,0	94,3
60 min	3,6 s	Lensun Gumbel I	114,5	138,5
		Lensun Gumbel II	63,0	75,4
		Lensun superpositio	107,6	132,0
	9 s	Lensun Gumbel I	100,2	122,8
		Lensun Gumbel II	66,8	76,4
		Lensun superpositio	95,1	118,4
	18 s	Lensun Gumbel I	91,3	113,7
		Lensun Gumbel II	66,7	75,8
		Lensun superpositio	87,5	110,7
	45 s	Lensun Gumbel I	81,7	104,9
		Lensun Gumbel II	64,2	74,1
		Lensun superpositio	79,2	103,3
	90 s	Lensun Gumbel I	76,6	100,8
		Lensun Gumbel II	62,5	75,1
		Lensun superpositio	74,9	100,0
	180 s	Lensun Gumbel I	72,4	97,7
		Lensun Gumbel II	59,8	76,4
		Lensun superpositio	71,4	97,5

120 min	3,6 s	Lensun Gumbel I	102,2	116,3
		Lensun Gumbel II	68,0	78,0
		Lensun superpositio	101,4	115,3
	9 s	Lensun Gumbel I	96,2	107,5
		Lensun Gumbel II	65,5	81,3
		Lensun superpositio	96,1	107,2
	18 s	Lensun Gumbel I	93,6	104,0
		Lensun Gumbel II	64,9	81,9
		Lensun superpositio	94,3	104,1
	45 s	Lensun Gumbel I	93,4	102,5
		Lensun Gumbel II	65,0	79,4
		Lensun superpositio	93,9	102,7
	90 s	Lensun Gumbel I	93,5	102,8
		Lensun Gumbel II	67,3	77,3
		Lensun superpositio	94,0	103,0
	180 s	Lensun Gumbel I	93,1	103,2
		Lensun Gumbel II	70,7	75,9
		Lensun superpositio	93,6	103,4



Kuva 5.22 Lensun menetelmien ennusteiden absoluuttinen keskivirhe aikaikkunan pituuden funktiona havaintoperiodilla 60 minuuttia.

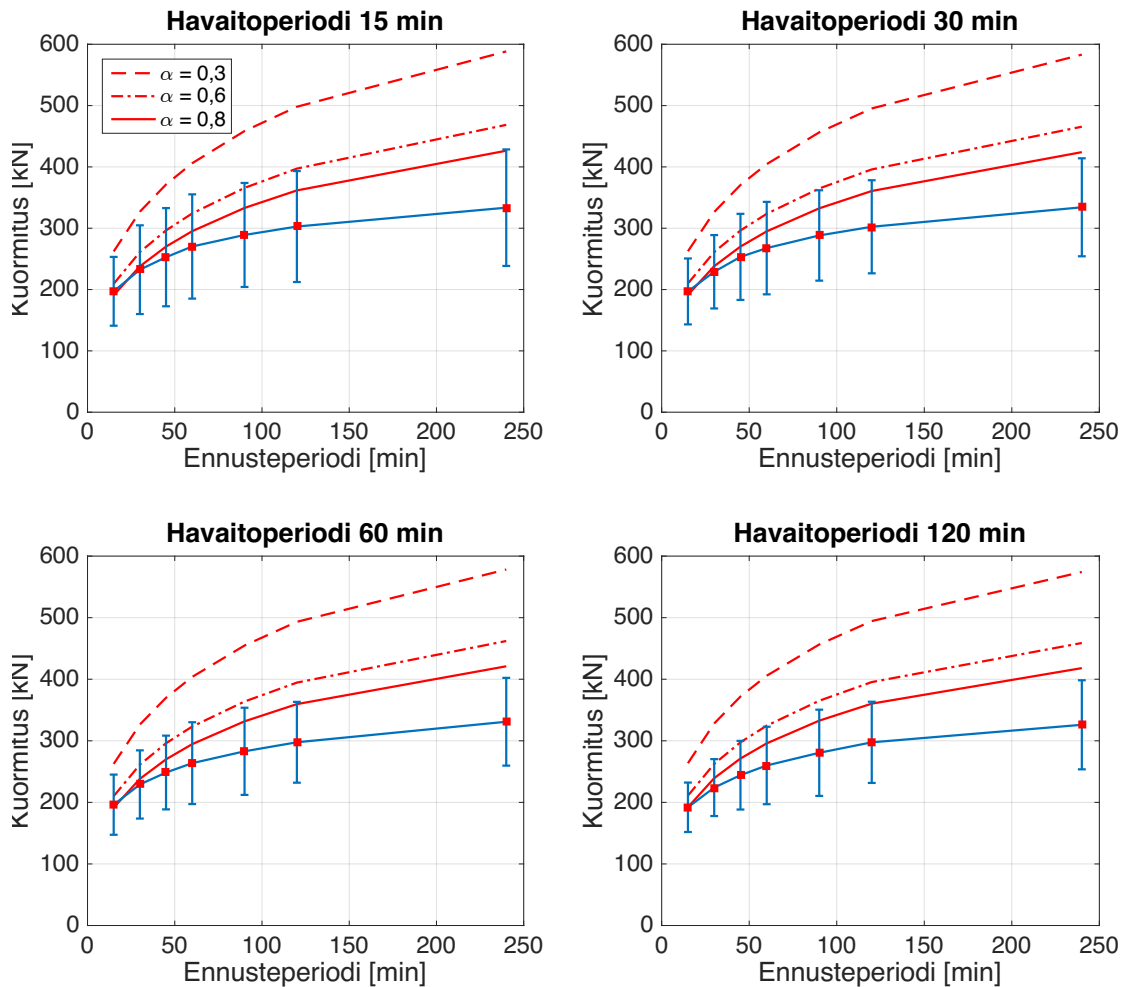
5.6 Riskiparametrin määrittäminen

Laivan operatiivista jääkuormamonitorointijärjestelmää varten on jääkuormatasoa ennustettaessa tärkeää, että ennuste ei merkittävästi aliarvioi tulevia jääkuormia, jolloin käsitys aluksen vaurioriskistä vääristyy. Ennusteen laskemiseen tulisi tämän vuoksi sisällyttää riskiparametri α , jolloin todennäköisimmän ääriarvon tilalle laskettaisiin arvo, jonka jääkuorma merkittävästi pienemmällä todennäköisyydellä ylittäisi.

Riskiparametri määriteltiin laskemalla jääkuormamaksimien ennusteet eri riskiparametrein ja testaamalla, millä riskiparametrin arvolla keskimääräinen ennuste riittää kattamaan ennustamisen virheen. Riskiparametrin määrittäminen suoritettiin ainoastaan Lensun Gumbel II-menetelmälle. Kuvassa 5.23 on esitetty mitattujen maksimi-arvojen keskiarvot ennusteperiodin funktiona sekä Lensun Gumbel II-menetelmän avulla ennus-

tettujen maksimi-arvojen absoluuttiset keskivirherajat. Lisäksi kuvassa on esitetty keskimääräiset ennusteet riskiparametreilla 0,3, 0,6 ja 0,8.

Kuvasta 5.23 voidaan todeta, että kahden tunnin ennusteperiodilla, jo riskiparametri 0,8 riittää kattamaan ennusteen virheen ja ennusteperiodilla 15 minuuttia tarvitaan riskiparametri 0,3 kattamaan virhe. Muilla ennusteperiodoilla riskiparametriksi soveltuu jokin 0,3 ja 0,8 välinen arvo. Taulukossa 5.10 on esitetty jokaiselle havainto- sekä ennusteperiodoille parhaiten soveltuvat riskiparametrit. Valittujen riskiparametrien arvot ovat kaikki melko korkeita.



Kuva 5.23 Keskimääräiset mitatut maximikuormat ennusteperiodin funktiona (sinisellä) sekä Lensun Gumbel II-menetelmän absoluuttiset keskivirherajat. Lisäksi punaiset käyrät kuvaavat riskiparametreilla 0,3, 0,6 ja 0,8 laskettuja ennustettuja maksimi-arvoja.

Taulukko 5.10 Eri havainto- ja ennusteperiodille parhaiten soveltuvat riskiparametrien arvot.

<i>Havaintoperiodi</i>	<i>Ennusteperiodi</i>	<i>Riskiparametri</i>
15 min	15 min	0,3
	30 min	0,3
	1 h	0,5
	2 h	0,6
	4 h	0,8
30 min	15 min	0,3
	30 min	0,4
	1 h	0,5
	2 h	0,6
	4 h	0,8
1 h	15 min	0,4
	30 min	0,5
	1 h	0,6
	2 h	0,8
	4 h	0,8
2 h	15 min	0,4
	30 min	0,5
	1 h	0,6
	2 h	0,8
	4 h	0,8

6 Johtopäätökset ja yhteenveto

Tässä diplomityössä käsiteltiin laivan runkoon kohdistuvia jääkuormia ja niiden tilastollista mallintamista, liittyen laivan operatiiviseen monitorointijärjestelmään. Työssä tutkittiin tilastollisia jakaumia, joiden avulla voidaan ennustaa tulevia lyhyen aikavälin todennäköisimpiä maksimijääkuormia. Ennustettuja todennäköisimpiä maksimijääkuormia voidaan käyttää jääkuormia monitoroitaessa, aluksen vaurioriskin arvioimiseen. Tutkitut jakaumat olivat eksponentti-, Weibull-, Gumbel I- ja Gumbel II-jakaumat. Lisäksi tutkittiin kolmea Lensun (2002) kehittämää skaalauskorrelaatioihin perustuvaa menetelmää, joita kutsuttiin Lensun Gumbel I-, Lensun Gumbel II- ja Lensun superpositiomenetelmiksi.

Aikaisemmat tutkimukset liittyen jääkuormien tilastolliseen mallintamiseen ovat keskittyneet pääasiallisesti pitkän ajan jääkuormamittauksiin ja jääkuormien pitkän aikavälin ennustamiseen. Lyhyen aikavälin jääkuorman ennustamista tilastollisin menetelmin ei ole aikaisemmin tutkittu tämän työn laajuudella. Lensu (2002c) ja Hänninen et al. (2001) ovat tutkineet Lensun menetelmien jakaumien soveltamista mitta-aineistoon vain yksittäisillä ajanjaksoilla, joiden ei voida olettaa antavan realistista kuvaa ennustemallien luotettavuudesta. Poiketen aikaisemmista tutkimuksista, tässä diplomityössä suoritetaan ensimmäistä kertaa Lensun menetelmien ja muiden tilastollisten mallien ennusteiden välistä vertailua.

Työn päätavoite oli määrittää, mikä käsitellyistä ennustemalleista soveltuu mitatun aineiston perusteella lyhyen aikavälin jääkuormien ennustamiseen kaikkein parhaiten ja, kuinka pitkä havaintoperiodin eli ennusteen laskentaan käytettävän ajanjakson tulisi olla, jotta ennuste olisi mahdollisimman luotettava. Lisäksi tutkittiin, kuinka pitkälle tulevaisuuteen jääkuormia on mahdollista suuntaa-antavasti ennustaa. Suominen ja Kujala (2015) ovat verranneet yhden ja 12:n tunnin jääkuormamaksimien sovittamista Gumbel I-jakauman avulla. Havaintoperiodin ja ennusteperiodin vaikutusta jääkuormien ennustamiseen ei kuitenkaan tätä lyhyemmän aikavälillä ole aikaisemmin tutkittu.

Ennusteiden laskentaan käytettävä mitta-aineisto kerättiin Etelämantereelle tarkoitetun tutkimus- ja huoltoaluksen S.A. Agulhas II:n Perämeren koematkalta maaliskuussa 2012. S.A. Agulhas II:n Perämeren koematkalta kerätty 24:n tunnin mitta-aineisto mitattiin lähes vakiojääolosuhteissa ja lisäksi mitta-aineistosta karsittiin ne osiot, joissa jääolosuhteet tai laivan nopeus eivät pysyneet tarpeeksi vakioina. Lopullinen mitta-aineisto, jota tässä diplomityössä käytettiin, oli pituudeltaan 11,33 tuntia. Tässä diplomityössä käsiteltiin ainoastaan keulan poikittaisiin kaariin kohdistuneita jääkuormia, sillä suurimmat kuormat esiintyvät yleensä laivan keulassa. Oletettavasti tulokset voidaan kuitenkin yleistää myös aluksen muihin osiin.

Tilastollisten jakaumien kelvollisuutta ennustaa tulevia jääkuormia tutkittiin usealla eri menetelmällä. Luvussa 5.2 eksponentti-, Weibull-, Gumbel I-, Gumbel II-, Lensun Gumbel I-, Lensun Gumbel II- sekä Lensun superpositiojakaumien avulla havaintoperiodille laskettuja todennäköisimpiä maksimijääkuormia verrattiin saman ajanjakson mitattuun maksimikuormaan. Vertailu suoritettiin 15, 30, 45, 60, 90 minuutin sekä kahden ja neljän tunnin havaintoperiodeilla. Tilastollisten menetelmien avulla arvioituja havaintoperiodien maksimiarvoja sekä havaintoperiodin mitattuja arvoja tarkkailtiin kahtena otoksena, joiden yhteensopivuutta testattiin kolmella eri tilastollisella testillä,

kahden otoksen Studentin t-testillä, Wilcoxonin kahden otoksen järjestyslukutestillä ja Kolmogorov-Smirnov -testillä. Lisäksi havaintoperiodien arvioiduille maksimiarvoille laskettiin absoluuttiset keskivirheet sekä keskineliövirheiden neliöjuuret.

Tutkimuksen tuloksista havaittiin, että Lensun menetelmät soveltuivat havaintoperiodien maksimiarvojen laskemiseen huomattavasti paremmin kuin muut menetelmät. Sekä virhearvojen että tilastollisten testien perusteella Lensun Gumbel I- ja superpositiomenetelmillä lasketut arvot sijaitsivat lähimpänä havaintoperiodin mitattuja maksimijääkuormia, mutta ero Lensun Gumbel II-jakauman arvoihin ei ollut erityisen merkittävä. Tässä diplomityössä päätettiin jatkaa ainoastaan Lensun menetelmien tutkimista, sillä niiden todettiin toimivan merkittävästi muita tutkittuja menetelmiä paremmin.

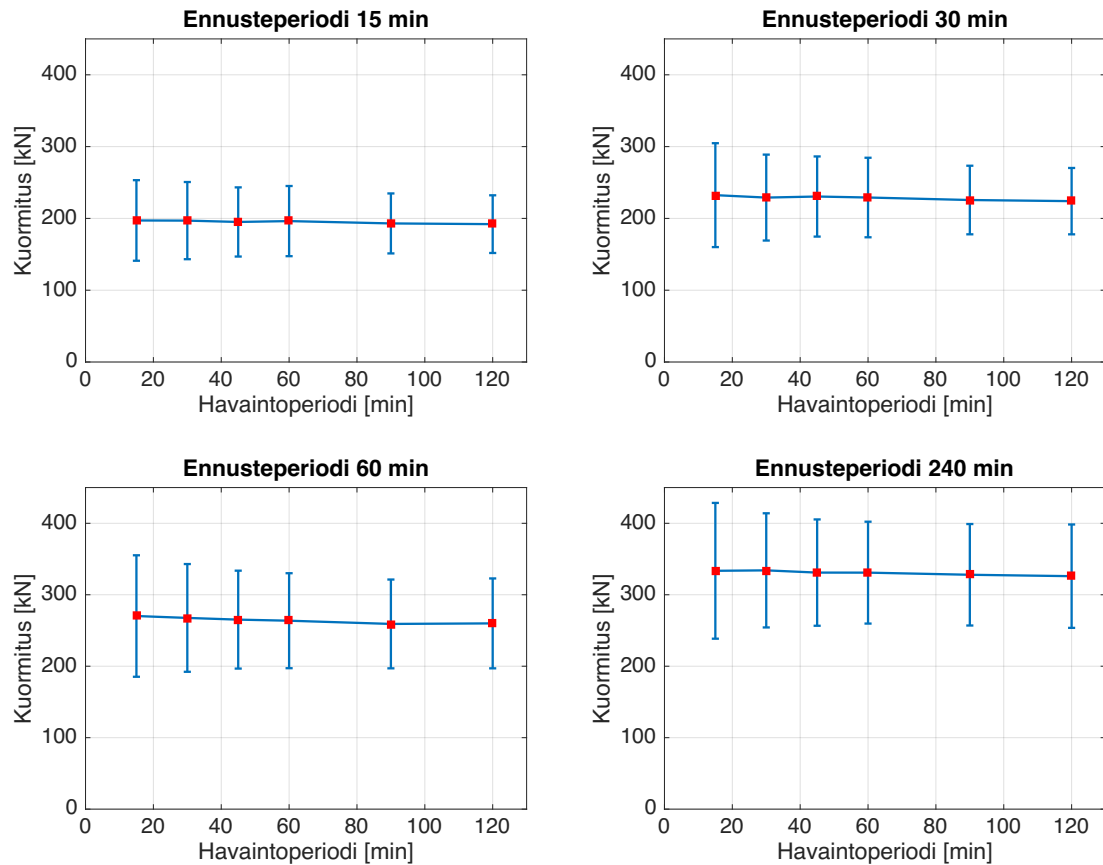
Luvussa 5.3 Lensun Gumbel I-, Lensun Gumbel II- ja Lensun superpositiomenetelmien avulla ennustettiin tulevan ajanjakson todennäköisimpiä maksimijääkuormia ja niitä verrattiin tulevan ajanjakson eli ennusteperiodin mitatun maksimiarvon kanssa. Jääkuormien maksimiarvon ennustamisen ollessa mallien lopullinen tarkoitus, ovat luvun 5.3 tulokset tämän diplomityön tärkein osio. Vertailu suoritettiin havaintoperiodeille 15, 30, 60, 90 ja 120 minuuttia ja myös ennusteperiodia vaihdeltiin siten, että ennuste laskettiin 15:lle ja 30:lle minuutille sekä yhdelle, kahdelle ja neljälle tunnille. Ennusteen ja mitatun arvon yhteensopivuutta mitattiin suorittamalla tilastolliset testit sekä määrittämällä ennusteille absoluuttiset keskivirheet ja keskineliövirheen neliöjuuret.

Lensun Gumbel I- ja superpositiomenetelmille hyväksyttiin enemmän tilastollisia testejä kuin Lensun Gumbel II-jakaumalle. Lensun Gumbel II-jakauman ennusteiden virhearvot olivat kuitenkin huomattavasti pienempiä kuin Lensun Gumbel I- ja superpositiomenetelmien virhearvot, jonka perusteella voidaan todeta Lensun Gumbel II-jakauman olevan enemmän robusti kuin Lensun Gumbel I- ja Lensun superpositiomenetelmät. Jääkuormituksen ollessa stokastinen prosessi, on olemassa olevalla tietämyksellä mahdotonta tarkasti ennustaa tulevia kuormia, joten jääkuorma-arvon suuntaa-antava ennustaminen on olennaisempaan kuin tilastollisten testien hyväksyminen. Virhearvojen sekä ennusteiden ja mitattujen arvojen visuaalisen vertailun perusteella todettiin Lensun Gumbel II-jakauman soveltuvan lyhyen aikavälin ennustamiseen kaikkein parhaiten.

Yhteenvetona, kuvissa 6.1 ja 6.2 on esitettyä tulevan ajanjakson keskimääräiset mitatut maksimiarvot sekä Lensun Gumbel II-jakauman avulla ennustettujen maksimijääkuormien absoluuttiset keskivirherajat, havainto- sekä ennusteperiodien funktioina. Kuten kuvista 6.1 ja 6.2 on havaittavissa, ennusteiden virhearvojen perusteella luotettavin ennuste saatiin ennusteperiodin ollessa mahdollisimman lyhyt ja havaintoperiodin ollessa mahdollisimman pitkä. Vaikkakin virhearvot kasvoivat havaintoperiodin pidentyessä, Lensun Gumbel II-menetelmä tuotti kaikilla havaintoperiodein pituuksilla melko luotettavan ennusteen. Virheen kasvu tasaantui kuitenkin havaintoperiodin pidentyessä, johtaen havaintoperiodien 60, 90 ja 120 minuuttia lähes vakioon virhearvoon. Tämän diplomityön tavoitteen ollessa mahdollisimman lyhyen havaintoperiodin pohjalta ennustaminen, valittiin operatiivisen jääkuormamonitorointijärjestelmän ennustemallin havaintoperiodiksi 60 minuuttia.

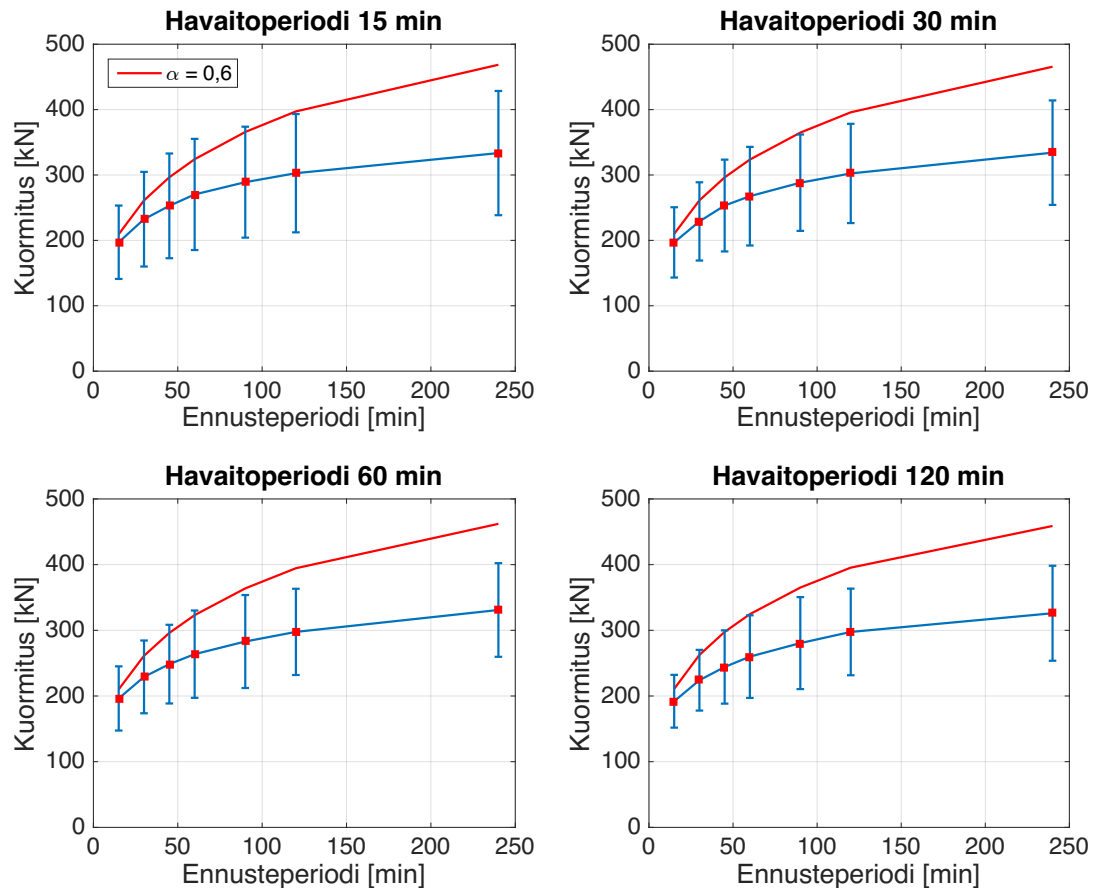
Kuten voidaan todeta kuvasta 6.2, Lensun Gumbel II-menetelmän virhearvot kasvoivat myös ennusteajanjakson pidentyessä. Virheen kasvu tasaantui myös ennusteperiodin pidentyessä ja yli 60 minuutin ennusteperiodin jälkeen virhe oli lähes vakio. Virhe-

arvojen perusteella voidaan todeta ennusteen olevan kaikilla ennusteperiodeilla kohtalaisen luotettava. Saadut tutkimustulokset, joiden mukaan 60 minuutin havaintoperiodien pohjalta saadun ennusteen luotettavuus säilyi melko luotettavalla tasolla 15:stä minuutista jopa neljään tuntiin, on tieteellisesti kiinnostava ja yllättävä havainto.



Kuva 6.1 Mitattujen maksimiarvojen keskiarvot havaintoperiodin funktiona sekä Lensun Gumbel II-menetelmän avulla ennustettujen maksimiarvojen absoluuttiset keskivirheet ennusteperiodeille 15, 30, 60 ja 240 minuuttia.

Laivan operatiivista jääkuormamonitorointijärjestelmää varten on jääkuormatasoa ennustettaessa tärkeää, että ennuste ei merkittävästi aliarvioi tulevia jääkuormia, jolloin käsitys aluksen vaurioriskistä vääristyy. Ennusteen laskemiseen tulisi tämän vuoksi sisällyttää riskiparametri, jolloin todennäköisimmän ääriarvon tilalle laskettaisiin arvo, jonka jääkuorma merkittävästi pienemmällä todennäköisyydellä ylittäisi. Riskiparametri määriteltiin tarkastelemalla, mikä riskiparametrin arvo riittää kattamaan ennusteen virheen. Luvussa 5.6 määriteltiin parhaiten soveltuva riskiparametri jokaiselle havainto- sekä ennusteperiodille. Kuvassa 6.2 on keskimääräisen mitatun maksimikuorman ja virhearvojen lisäksi esitettynä Lensun Gumbel II-menetelmän ennuste riskiparametrilla 0,6. Tämä riskiparametri riittää kattamaan ennusteen virheen kahden ja neljän ennusteperiodeilla, mutta lyhyemmällä ennusteperiodilla riskiparametrin tulisi olla pienempi.



Kuva 6.2 Ennusteperiodien keskimääräiset mitatut maksimikuormat sekä Lensun Gumbel II-menetelmän avulla ennustettujen maksimiarvojen absoluuttiset keskivirhe-rajat havaintoperiodeille 15, 30, 60 ja 120 minuuttia.

Lisäksi, kun Lensun menetelmien oli todettu toimivan parhaiten, tutkittiin aikaikkunan pituuden vaikutusta ennusteen luotettavuuteen, vertaamalla eri aikaikkunan pituuksilla ennustettuja todennäköisimpiä maksimijääkuormia tulevan ajanjakson mitattuun maksimiarvoon. Tulosten perusteella todettiin, että aikaikkunan vaikutus Lensun Gumbel II-menetelmän ennusteeseen ei ole merkittävä ja, että kaikki testatut aikaikkunan pituudet soveltuvat Lensun Gumbel II-menetelmällä lyhyen aikavälin maksimikuorman ennustamiseen. Lensun Gumbel I- ja superpositiomenetelmillä aikaikkunan pituus ei merkittävästi vaikuta ennusteen luotettavuuteen yli 45:n sekunnin pituuksilla ja menetelmiin soveltuvat testatuista aikaikkunan pituuksista pituudet 45-180 sekuntiin. Aikaikkunan vähäinen vaikutus ennustearvon luotettavuuteen johtunee siitä, että ennusteisiin käytettävät Hurstin eksponentti ja H' -arvo eivät määräydy valitun aikaikkunan mukaan. Sen sijaan nämä lasketaan varioimalla aikaikkunan pituutta ja määrittämällä aikaikkunan pituuden ja aikaikkunan keskimääräisen maksimikuorman riippuvuus eri asteikoilla. Kuten luvussa 4.6.1 todettiin, riippuvuus on lineaarisempi logaritmisella asteikolla kuin semilogaritmisella asteikolla. Lensun Gumbel II-jakauman ennusteeseen käytettävä Hurstin eksponentti määräytyy logaritmisin asteikon kulmakertoimen mukaan, Lensun Gumbel I-jakauman ennusteeseen käytettävän H' -arvon määräytyessä semilogaritmisin asteikon kulmakertoimen mukaan. Tästä johtuen Lensun Gumbel I- ja superpositiomenetelmät ovat hieman herkempiä aikaikkunan vaihteluun kuin Lensun Gumbel II-menetelmä.

Tässä diplomityössä tutkittiin ennusteen laskemista ainoastaan mitta-aineistolla, jossa jääolosuhteet ja laivan nopeus pysyivät lähes vakioina. Näin ollen ennustemallin ei odoteta toimivan vaihtelevissa olosuhteissa ja, jotta mallia voidaan käyttää laivan operatiivisessa monitorointijärjestelmässä, tulee miehistön joko itse pystyä huomaamaan jääolosuhteiden ja laivan nopeuden muutokset ja huomioida niiden vaikutus jääkuormiin tai tulee alukseen asentaa järjestelmä, joka pystyy niitä monitorimaan. Jääolosuhteiden tai nopeuden muuttuessa tulee jääkuorman ennusteen laskeminen aloittaa alusta, jotta ennuste olisi luotettava.

Jotta saataisiin vieläkin parempi käsitys mallin toimivuudesta Lensun Gumbel II-mallin luotettavuutta tulisi tulevaisuudessa tutkia erilaisissa jääolosuhteissa kerätyillä mitta-aineistoilla. Ennustemallia suositellaan myös tutkittavan vaihtelevissa jääolosuhteissa, jotta saataisiin käsitys siitä, miten laajasti ennusteen voidaan olettaa säilyttävän luotettavuutensa.

7 Lähdeluettelo

Daley, C., St. John, J., Seibold, F. & Bayly, I., 1984. *Analysis of Extreme Ice Loads Measured on USCGC Polar Sea. Transactions of the SNAME Annual Meeting.* New York.

Daley, C., Howard, D. & Frere, D., 1988. *Measurement of Ice Forces on Small Vessels. Report by Fleet Technology Limited to Transportation Development Centre, Report No. TP 9451E.* Montreal, Canada.

Daley, C. & Riska, K., 1990. *Review of ship-ice interaction mechanics Report from Finnish-Canadian Joint Research Projects No. 5 "Ship interaction with actual ice conditions" Interim Report on Task 1A.* Laivalaboratorio, Teknillinen korkeakoulu. Raportti M-102. Espoo. ISBN 951-22-0387-1.

Dome Petroleum Limited, 1982. *Final Report on the Full Scale Measurements of the Ice Impact Loads and Response of the KIGORIAK, August and October, 1981.* Sisäinen raportti. (Julkaisematon)

Edwards, R., Johnson, B., Dunne, M., Comfort, G. & Bulat, V., 1981. *Results of Full Scale Trials in Ice of CCGS Pierre Radisson. Proc. SNAME STAR Symp.* Ottawa, Canada.

Frederking, R., 2005. *Local ice pressures on the Oden 1991 Polar Voyage. Proceedings 18th International Conference on Port and Ocean Engineering Under Arctic Conditions, POAC'05, Vol.1.* Ottawa, Canada.

German & Milne, 1973. *Report on Tests to Measure Ice Forces on the Hull of an Icebreaker and the Penetration of an Icebreaker in Ice.* MOT Req. T8257-3- 0010 for the Canadian Coast Guard, Sept.

Glen, I. et.al., 1981. *Results of Full Scale Measurements Aboard CCGS Louis S. St. Laurent During a 1980 Fall Arctic Probe. Report 737C by Arctec Canada Limited to Canadian Coast Guard, April.*

Gumbel, E., 1958. *Statistics of extremes.* Columbia University Press. New York.

Gylden, R. & Riska, K., 1989. *Ice load measurements onboard MS Kemira, winter 1989.* Laivalaboratorio, Teknillinen korkeakoulu. Raportti M-93. Espoo.

Haight, A., 1967. *Handbook of the Poisson distribution.* John Wiley and Sons. New York.

Hoffmann, L., 1985. *Impact Forces and Friction Coefficients on the Forebody of the German Polar Research Vessel POLARSTERN. Proc. POAC '85.* Narssarssuaq, Greenland.

Hänninen, S., 2002. *Tilastollisten menetelmien soveltaminen laivan kaaren mitoitusjätkuorman määrittämisessä Itämerellä. Diplomityö.* Laivalaboratorio, Teknillinen korkeakoulu. Espoo.

Hänninen, S., Lensu, M. & Riska, K., 2001. *Analysis of the ice load measurements during USCG Healy ice trials, spring 2000. Laivalaboratorio, Teknillinen korkeakoulu. Raportti M-265. Espoo. ISBN 951-22-5781-5.*

Hänninen, S. & Lensu, M., 2002. *Aspects of ice load monitoring analysed using ARCDEV ice load database. Laivalaboratorio, Teknillinen korkeakoulu. Raportti M-274. Espoo. ISBN 951-22-6258-4.*

ISSC committee, 2015. *ISSC committee V.6 Arctic Technology. 19th International Ship and Offshore Structures Congress, Volume 2. Cascais, Portugal.*

Jordaan, I., Nessim, M., Ghoneim, G. & Murray, M., 1987. *A Rational Approach to the Development of Probabilistic Design Criteria for Arctic Shipping. Proceedings of the 6th International Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symposium, OMAE '87.*

Jordaan, I., Maes, M., Brown, P. & Hermans, I., 1993. *Probabilistic analysis of local ice pressures. Offshore Mech. Arct, ASME J.*

Kheisin, D. & Popov, Y., 1973. *Ice Navigation Qualities of Ships. Draft translation 417. Cold Regions Research and Engineering Laboratory (CRREL). Hanover, New Hampshire.*

Kotilainen, M., 2014. *Statistical modeling of ice-induced loads on a research vessel. Diplomityö. Aalto-yliopisto, Perustieteiden korkeakoulu. Espoo.*

Kotisalo, K. & Kujala, P., 1998. *Ice load measurements onboard MT Uikku: Measurement results from the ARCDEV voyage to Ob esuary, April-May 1998. Laivalaboratorio, Teknillinen korkeakoulu. Raportti D-47. Espoo.*

Korri, P. & Varsta, P., 1979. *On the Ice Trial of a 14500 DWT Tanker on the Gulf of Bothnia. Proc. of NSTM-79. Helsinki.*

Kujala, P. & Vuorio, J., 1985. *On the statistical nature of the ice-induced pressures measured on board I.B. Sisu. Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC'85. Narssarssuaq, Greenland.*

Kujala, P. & Vuorio, J., 1986. *Results and statistical analysis of ice load measurements on board icebreaker Sisu in winters 1979 to 1985. Winter navigation research board. Research Report No 43. Espoo. ISBN 951-46-9701-4.*

Kujala, P., 1989. *Results of Long-Term Ice Load Measurements onboard Chemical Tanker Kemira in the Baltic Sea during the Winters 1985 to 1988. Winter Navigation Research Board, Research Report No. 47. Espoo. ISBN 951-47-3109-3.*

Kujala, P., 1994. *On the statistics of ice loads on ship hull in the Baltic. Acta Polytechnica Scandinavica, Mechanical engineering series No. 116. Espoo. ISBN 951-666-432-6.*

Kujala, P., 1999. *Statistical analysis of the ice load measurements onboard MT Uikku during the ARCDEV voyage in 1998*. Laivalaboratorio, Teknillinen korkeakoulu. Raportti D-51. Espoo.

Kujala, P., Suominen, M. & Riska, K., 2009. *Statistics of Ice Loads Measured on MT Uikku in the Baltic*. Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions , POAC'09. Luleå, Sweden.

Kujala, P. & Riska, K., 2010. *Talvimerenkulku*. Teknillinen korkeakoulu, raportti AM-13. ISBN 978-952-60-3016-6.

Kujala, P., Kulovesi, J., Lehtiranta, J. & Suominen, M., 2014. *Full-Scale Measurements on board S.A. Agulhas II in the Antarctic Waters 2013-2014*. Aalto University.

Lensu, M. & Karttunen, J., 2001. *Operative ice load monitoring on board MT Uikku in March 2001*. Arktisen meritekniiikan tutkimuskeskus, Laivalaboratorio, Teknillinen korkeakoulu. Raportti M-264. Espoo. ISBN 951-22-5628-2.

Lensu, M., 2002a. *Ice navigation assisted by short term ice load monitoring*. Laivalaboratorio, Teknillinen korkeakoulu. Raportti M-265. Espoo. ISBN 951-22-6259-2.

Lensu, M., 2002b. *MT Uikku as an ice load measurement platform*. Laivalaboratorio, Teknillinen korkeakoulu. Raportti M-267. Espoo. ISBN 951-22-5830-7.

Lensu, M., 2002c. *Short term prediction of ice loads experienced by ice going ships*. Laivalaboratorio, Teknillinen korkeakoulu. Raportti M-269. Espoo. ISBN 951-22-5863-3.

Lensu, M. & Hänninen, S., 2003. *Short term monitoring of ice loads experienced by ships*. Proceedings of the 17th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. Trondheim, Norway.

Levine, G., Voelker, R. & Kotras, T., 1973. *A Full Scale Test Program on a Great Lakes Ore Carrier during Winter Operations*. Report to the U.S. Maritime Administration by Arctec Inc.

Mann, H. & Whitney, D., 1947. *On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other*. Annals Mathematical Statistics, Vol. 18, No. 1.

Muhonen, A., 1991. *Ice load measurements onboard the MS Kemira, winter 1990*. Laivalaboratorio, Teknillinen korkeakoulu. Raportti M-109. Helsinki.

Muhonen, A., 1992. *Ice load measurements onboard the MS Kemira, winter 1991*. Laivalaboratorio, Teknillinen korkeakoulu. Report M-121. Helsinki.

Riska, K. & Varsta, P., *Structural Ice Loads in the Baltic*, Proc. WEGEMT Seventh Graduate School, Ships and Structures in Ice, Helsinki.

Ralph, F. & Jordaan, I., 2013. *Probabilistic methodology for design of arctic ships*. Proceedings of the ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. OMAE2013-10533. Nantes, France.

Riska, K., 2011. *Design point in ice class rules. Winter navigation research board. Research Report No 71. ISSN 2342-4303.*

Ochi, M., 1990. *Applied probability and stochastic processes in engineering and physical sciences. Jon Wiley and Sons. ISBN 0-471-85742-4.*

Patey, M., 2000. *Statistical analysis for monitoring of ship hull ice loads. Diplomityö. Konetekniikan laitos, Teknillinen korkeakoulu. Espoo.*

Smirnov, N., 1948. *Table for estimating the goodness of fit of empirical distribution. Annals of Mathematical Statistics, Vol. 19, No. 2.*

Student, 1908. *The probable error of a mean. Biometrika, Vol. 6, No. 1.*

Suominen, M., 2011. *Statistical modeling of ice induced loads on a ship hull in the Baltic Sea. Diplomityö. Aalto-yliopisto. Espoo.*

Suominen, M., Romanoff, J., Remes, H. & Kujala, P., 2015. *The determination of ice-induced loads on the ship hull from shear stress measurements. MARSTRUCT 2015. Department of Applied Mechanics, School of Engineering, Aalto University. Espoo.*

Suominen, M., Kujala, P., Kotilainen, M., 2015. *The encountered extreme events and predicted maximum ice-induced loads on the ship hull in the southern ocean. Proceedings of the ASME 2015 434th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2015. Espoo.*

Suominen, M., Karhunen, J., Bekker, A., Kujala, P., Elo, M., von Bock und Polach, R., Enlund, H. & Saarinen, S., 2013. *Full-scale measurements on board PSRV S.A. Agulhas II in the Baltic Sea. Proceedings of the 22nd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC'13. Espoo.*

Suominen, M. & Kujala, P., 2010. *Analysis of short-term ice load measurements on board MS Kemira during winters 1987 and 1988. Series AM. Report AALTO-AM-22. Aalto University, School of Science and Technology. Espoo.*

Suominen, M. & Kujala, P., 2014. *Variation in short-term ice-induced load amplitudes on a ship's hull and related probability distributions. Cold Region Science and Technology, Vol 106-107, s.131-140.*

Suominen, M. & Kujala, P., 2015. *The measured line load as a function of the load length in the Antarctic waters. Proceedings of the 23rd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC'15. Espoo.*

Suyuthi, A., Leira, B. & Riska, K., 2012a. *Short term extreme statistics of ice loads on ship hulls. Cold Regions Science and Technology 82. 130-143. Trondheim., Norway.*

Suyuthi, A., Leira, B., Riska, K., 2012b. *Statistics of local peaks on ship hulls. Structural Safety. Vol 40. 1-10. Trondheim.*

Taylor, R., Jordaan, I., Li, C. & Sudom, D., 2010. *Local design pressures for structures in ice: analysis of full-scale data. Offshore Mech. Arct. ASME J.*

Varsta, P., 1983. Modelling of impact between ship hull and ice. Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC '83. Helsinki.

Varsta, P., 1984. Determination of ice loads semiempirically. In Ship strength and winter navigation. Technical Research Center of Finland. VTT Symposium 52. Espoo.

VTT. 2014. Hull ice load measuring system on NB Oblique icebreaker "Baltika", Technical documentation. VTT. Espoo.

Vuorio, J. 1979. Development of measuring system for ice induced loads on ship hull. Diplomityö. Konetekniikan laitos, Teknillinen korkeakoulu. Espoo.

Vuorio, J., Riska, K. & Vartsa, P., 1979. Long term measurements of pressure and ice induced stresses on icebreaker Sisu in winter 1978. Winter navigation research board. Research Report No 28. Espoo. ISBN 951-46-3979-0.

Weibull, W., 1951. A statistical distribution function of wide applicability. ASME Journal of Applied Mechanics. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers.

Wilcoxon, F., 1945. Individual Comparisons by Ranking Methods. Biometrics Bulletin, Vol. 1, No. 6.